

Vom Fachbereich Maschinenwesen der Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

---

Ablaufgeregelte Entwicklung des hoch belasteten Klapparmes eines  
neuartigen Klappmechanismus für trailerbare Katamarane.

vorgelegt

von

Stefan Stange

Köln

---

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Wissussek

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Künne

Tag der mündlichen Prüfung: 20.03.2007

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b><i>Einleitung</i></b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b><i>Grundlagen der Produktentwicklung</i></b>	<b>4</b>
2.1	Definition der Detailprozesse	5
2.2	Ein neutrales Produktmodell als Basis	9
2.3	Nutzung eines Produktmodells aus fachspezifischen Modellen in Dateien	10
<b>3</b>	<b><i>Konzept für eine ablaufgeregelte Produktentwicklung</i></b>	<b>13</b>
3.1	Software-Architektur für das Konzept	13
3.2	Darstellung der ablaufgeregelten Produktenwicklung	16
3.3	Konstruktion als Kernprozess innerhalb der Produktentwicklung	22
3.4	Berechnung des Festigkeitsnachweises mit FEM	26
3.5	Fertigungssimulation eines 3D-CAD-Modells mit CAM	29
3.6	Produktdatenverwaltung bei verteilten Standorten mit PDM	30
3.7	Herstellung eines Prototypen	31
3.8	Gewählte IT-Systeme für das Konzept	34
<b>4</b>	<b><i>Klappmechanismus für einen Katamaran</i></b>	<b>39</b>
4.1	Segelboot-Typen	41
4.2	Segeltechnik	43
4.3	Segeleigenschaften und Aufbau eines Katamaran	45
4.4	Produkt-Findung	48
<b>5</b>	<b><i>Produktkonzeption für das Beispiel „trailerbarer Katamaran“</i></b>	<b>51</b>
5.1	Anforderungen an den Klappmechanismus	52
5.2	Vorbereitende Entwicklungsarbeiten für ein neues Konzept	55
5.3	Beschreibung des endgültigen Aufbaus eines trailerbaren Katamarans	61
<b>6</b>	<b><i>Belastungsgerechte Produktdefinition durch Anwendung der FE-Methode</i></b>	<b>68</b>
6.1	Werkstoffe für den Bootsbau	69
6.2	Belastungen an einem Segelschiff	74
6.3	Konstruktive Gestaltung des Einzelteils „Gelenkarm“	84
6.4	Iterative Ermittlung der endgültigen Gelenkarmgeometrie	86
6.5	Überprüfung der FEM-Ergebnisse an einem Ersatz-Modell	99
<b>7</b>	<b><i>Optimierung des Beispiels „Klappmechanismus“</i></b>	<b>104</b>
7.1	Erstellung eines Prototypen als Modell	105
7.2	Optimierung des Konzeptes	111
<b>8</b>	<b><i>Zusammenfassung</i></b>	<b>128</b>
<b>9</b>	<b><i>Literaturverzeichnis</i></b>	<b>130</b>

---

<b>10</b>	<b><i>Abbildungsverzeichnis</i></b>	<b><i>133</i></b>
<b>11</b>	<b><i>Anhang</i></b>	<b><i>136</i></b>

## 1 Einleitung

Mit dem ständig zunehmenden Einsatz der Informationstechnologie erhält heute jedermann einen Zugang zu dem weit verbreiteten Internet und damit auch einen Zugang zu einer Fülle von Informationen, unter anderem auch über die Produkte der Konsumgüterindustrie. Diese vielfältigen Möglichkeiten üben einen erheblichen Einfluss auf die Wünsche der Konsumenten aus und führen darüber hinaus zu einer ständigen Verkürzung des Produktlebenszyklus der Konsumgüter. Die Kunden vergleichen mit diesen neuen Gegebenheiten die von ihnen benötigten oder gewünschten Produkte und Dienstleistungen der anbietenden Lieferanten hinsichtlich der Qualität und der Lieferfähigkeit ihrer Angebote. Dieser enorme Wandel in der Konsumgüterindustrie verlangt von den Produzenten eine kontinuierliche Qualitäts- und Effizienzverbesserungen ihrer Prozesse, um den ständig steigenden Anforderungen der Kunden gerecht zu werden. Dies bedeutet aber auch, dass die Komplexität der Entwicklung ihrer Produkte ebenfalls weiter zunimmt. Um mit diesem auch durch die Globalisierung verursachten Innovationstempo mithalten zu können, verlangt der weltweite Wettbewerb von den einzelnen Produzenten enorme Anstrengungen in Bezug auf ihre Organisationsstrukturen, aber auch hinsichtlich der Gestaltung der Prozesse in der Produktentwicklung.

Für den Produktentwicklungsprozess bedeutet dies, dass der Einsatz der Informationstechnologie in allen Bereichen der produzierenden Unternehmen einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor darstellt, da heute nicht nur die Qualität und der Preis allein für den Verbraucher maßgebend sind, sondern insbesondere interessiert ihn, wann das von ihm gewünschte Produkt geliefert werden kann. Dies wiederum stellt erhöhte Anforderungen an die Geschäftsprozesse eines Unternehmens, die sich allerdings nur dann optimieren lassen, wenn die Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Produktentwicklung in den einzelnen Unternehmensbereichen bekannt und auch wirklich genutzt werden. Wenn dies nicht so ist, können Änderungen auf Grund veränderter Rahmenbedingungen in einem Produktentwicklungsprozess keine Berücksichtigung finden.

Jedes neue Produkt, egal welchem Zweck es auch dient, verursacht zunächst Kosten und soll im Ergebnis möglichst auch einen Gewinn (Mehrwert) erwirtschaften. Dieser Vorgang lässt sich mit Hilfe einer Wertschöpfungskette gemäß der **Abbildung 1-1** anschaulich darstellen. Eine Wertschöpfungskette basiert auf einer Reihe von Prozessen die sowohl die Entwicklung und die Herstellung eines Produktes als auch dessen Anwendung bzw. Nutzung

beinhalten und damit wird auch gleichzeitig der gesamte Produktlebenszyklus beschrieben. Zu den Prozessen gehören im Einzelnen die Produktentwicklung, die Produktionsvorbereitung, die Produktion, das Marketing und der Vertrieb, der Service und die Entsorgung. Alle diese Prozesse lassen sich wiederum in Einzelprozesse gliedern. Dieses gilt insbesondere für den sehr komplexen Prozess der Produktentwicklung, denn nur ein qualitativ hochwertiges Produkt, welches sich auch noch an den Marktbedürfnissen orientiert, bringt den produzierenden Unternehmen einen wirtschaftlichen Erfolg. Im Rahmen dieser Arbeit steht der Prozess einer durchgängigen **Produktentwicklung** im Vordergrund, so dass auf die der Produktentwicklung nachgeschalteten Prozesse auch nicht weiter eingegangen wird.

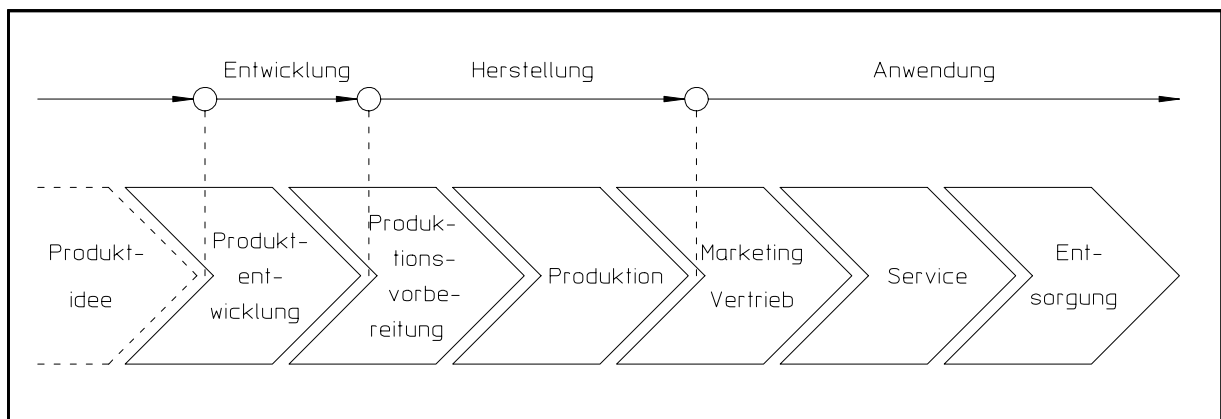


Abbildung 1-1: Wertschöpfungskette (in Anlehnung an [1])

Zur Darstellung einer konkreten durchgängigen Produktentwicklung muss allerdings ein reales Produkt definiert werden, da ansonsten kein Nachweis erbracht werden kann, dass das hier zu entwickelnde Konzept auch umsetzbar ist. Grundsätzlich ist die Auswahl des Produktes für die Formulierung dieses Konzeptes ohne Belang, aber wegen der gewünschten Allgemeingültigkeit soll das ausgewählte Produkt ein Mindestmass an Komplexität aufweisen und entsprechende Anforderungen an die Konstruktion und das Design stellen, die darüber hinaus nach einem entsprechenden Festigkeitsnachweis verlangen und deren Komponenten eventuell auch noch Kollisionen ausgesetzt sind.

In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen des Produktentwicklungsprozesses erarbeitet, bevor die Notwendigkeit einer ablaufgeregelten Produktentwicklung in Kapitel 3 formuliert wird. Da ein derart komplexer Entwicklungsprozess ohne die erforderlichen Hilfsmittel nicht zu bewerkstelligen ist, werden in diesem Kapitel auch noch die IT-Komponenten definiert, die im Rahmen des Konzeptes berücksichtigt werden. Nach der Definition eines Produktbeispiels in Kapitel 4, dessen Nicht-Vorhandensein internetweit recherchiert wird, werden die

Anforderungen an dieses Produkt im Hinblick auf seine mögliche Umsetzbarkeit konzipiert. Mit dem Detailprozess der Produktkonzeption in Kapitel 5 werden die Grundprinzipien mittels CAD für das neu zu entwickelnde Produkt iterativ generiert. Die hier vorgeschlagene Grobgestaltung führt in Kapitel 6 zu der tatsächlichen Produktdefinition, indem unter der Berücksichtigung der Randbedingungen die Festigkeit der Produkt-Komponenten überprüft wird. Damit das neue Produkt hinsichtlich seiner Produkteigenschaften getestet werden kann, wird in dem Kapitel 7 ein Prototyp entworfen, welcher einer Erprobung unterzogen werden kann. Diese Kontrolle führt zwangsläufig zu neuen Anforderungen, welche mittels einer Optimierung realisiert werden. Eine Zusammenfassung verbunden mit einem kurzen Ausblick in Kapitel 8 schließt die Beschreibung und Ausführung eines ablaufgeregelten Produktentwicklungsprozesses ab.

## 2 Grundlagen der Produktentwicklung

Die Aufgabe einer Produktentwicklung besteht darin, ein Produkt zu entwickeln, welches später dem produzierenden Unternehmen den Zugang zu einem Markt ermöglicht, damit dieses einen Mehrwert zum Fortbestand des Unternehmens erzielen kann. Anders ausgedrückt, ein Produkt verbindet ein Unternehmen mit dem Markt, vorausgesetzt, dass die Kunden an diesem Produkt auch wirklich interessiert sind. Dies bedeutet, dass die Unternehmen ihre Prozesse so gestalten müssen, dass die von dem entwickelten und gebaueten Produkt bereitgestellte Funktionalität und auch seine Handhabbarkeit den Markterfordernissen tatsächlich entsprechen. Diese Kausalität zeigt, dass das Ergebnis der Produktentwicklung, ein so genanntes markgerechtes Produkt, in einem ursächlichen Zusammenhang mit den Prozessen steht, die zur Entwicklung dieses Produktes beitragen.

In diesem Zusammenhang ist es sicherlich interessant, wie die Inhalte der Begriffe Produktentwicklung bzw. Produktentwicklungsprozess definiert sind. Die Beschreibungen sind weder von den produzierenden Unternehmen noch von der Wissenschaft eindeutig formuliert und auch in der Literatur finden sich dazu inhaltlich sehr unterschiedliche Definitionen. Die Definitionen beinhalten

- a) im weitesten Sinne den gesamten Lebenszyklus eines Produktes und
- b) im engeren Sinne nur die Gestaltung und die festigkeitsgerechte Nachrechnung eines Produktes.

Zur Verdeutlichung sind hier nachfolgend einige Definitionen auszugsweise wiedergegeben.

Zu a) In der Enzyklopädie von [2] ist definiert: *„Mit dem Ausdruck Produktentwicklung wird der Vorgang bezeichnet, den eine Ware von der Idee bis zum verkaufsfähigen (serienreifen) Erzeugnis nimmt.“* In der Arbeit von [3] wird dieser Sachverhalt folgendermaßen wiedergegeben: *Der Produktentwicklungsprozess umfasst die „Summe aller operativen und steuernden Aktivitäten, die – beginnend mit der ersten Produktidee bis zum Auslauf – die Eigenschaften, Kosten und Erträge, Marketing und Vertrieb und Kundendienst des Produktes festlegen und sicherstellen.“ Die Produktentwicklung beschreibt „die Gesamtheit der Teilprozesse und ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten.“*

Zu b) In [1] werden unter dem Begriff der Produktentwicklung alle Tätigkeiten und Prozesse zusammengefasst, die nach Vorlage einer Produktidee dieses Produkt konstruktiv gestalten und dafür alle notwendigen Fertigungsunterlagen herstellen und danach wird dieses

Ergebnis der Produktionsvorbereitung zugeführt (vgl. Abbildung 1-1). Der Inhalt der Produktentwicklung ist von [4] innerhalb des umfassenden Begriffes vom „*Kooperativen Produkt-engineering als integrierter Prozess von der Produkt- / Geschäftsidee bis zum erfolgreichen Markteintritt*“ eingebettet, wobei er den Anteil der Produktentwicklung folgendermaßen wiedergibt: „*vom Entwicklungsauftrag zur Produktkonstruktion*“.

Die unter b) wiedergegebenen Definitionen sind wissenschaftlich belegt und sollen im weiteren Verlauf der Arbeit für die Entwicklung eines Konzeptes als Basis dienen. Zunächst werden die Detailprozesse definiert, die gemäß dieser Definition zu einem Produktentwicklungsprozess gehören.

## **2.1 Definition der Detailprozesse**

Der mit der Globalisierung verbundene weltweite Zugang der Kunden zu allen Produkten erleichtert diesen einen ständigen Vergleich der Produkte hinsichtlich ihres Preises, ihrer Qualität, ihrer Verfügbarkeit, ihres Service, etc., so dass die produzierenden Unternehmen wettbewerbsbedingt vor sehr großen Herausforderungen stehen. Die Entwicklung von neuen Produkten, von wem auch immer initiiert, erfordert von den Unternehmen, dass diese ihre internen Abläufe und damit auch ihren Produktentwicklungsprozess an diese Gegebenheiten anpassen. Einen so genannten „*exakten*“ Prozessverlauf kann es nicht geben, zumal sich die Marktbedürfnisse jederzeit und unvorhersehbar ändern können, so dass immer ein gewisses Maß an Flexibilität gefordert ist. Diese Flexibilität ist nur durch einen bereichsübergreifenden und durchgängigen Einsatz von IT-Systemen in einem Unternehmen zu realisieren. Für eine optimierte Produktentwicklung ist insbesondere die „*Durchgängigkeit*“ in der Prozessabwicklung von höchster Bedeutung, um einerseits so genannte ungewollte Redundanzen bei der Generierung der Produktdaten durch die IT-Systeme zu verhindern und um andererseits mögliche Übertragungsfehler beim Austausch der Produktdaten zwischen den IT-Systemen zu vermeiden.

Der hier beschriebene Zusammenhang zwischen den Produkten und den Prozessen, mit denen die Produkte erzeugt werden, stellt sich in Abhängigkeit der jeweiligen Betrachtungsweise unterschiedlich dar. Während ein Kunde kenntnisbedingt überwiegend nur das Ergebnis des Entwicklungsprozesses, das Produkt, sieht, sind für das produzierende Unternehmen sowohl die Umsetzung der an das Produkt gestellten Anforderungen von enormer Wichtigkeit, als auch die Realisierung der geforderten Funktionalitäten und insbesondere mit welchen Prozessen dies erreicht werden kann.



Dies bedeutet, für die Unternehmen sind die Prozesse der Produktentwicklung von hoher Bedeutung, denn nur mit der Kenntnis der exakten Zusammenhänge der beteiligten Unternehmensbereiche ist eine zielgerichtete Vorgehensweise in der Entwicklung möglich, so dass die hergestellten Produkte jederzeit eine Verbindung zwischen Markt und Unternehmen eröffnen [3]. Durch den zweifelsfrei vorhandenen Zusammenhang zwischen Produkt und Prozess kann die Produktentwicklung auch als Problemlösungsprozess und somit auch als Teilprozess innerhalb des Wertschöpfungsprozesses verstanden werden. In Anlehnung an die Abbildung 1-1 wird deshalb die Phase „*Entwicklung*“ in die folgenden einzelnen Detailprozesse gemäß der **Abbildung 2-1** detailliert.

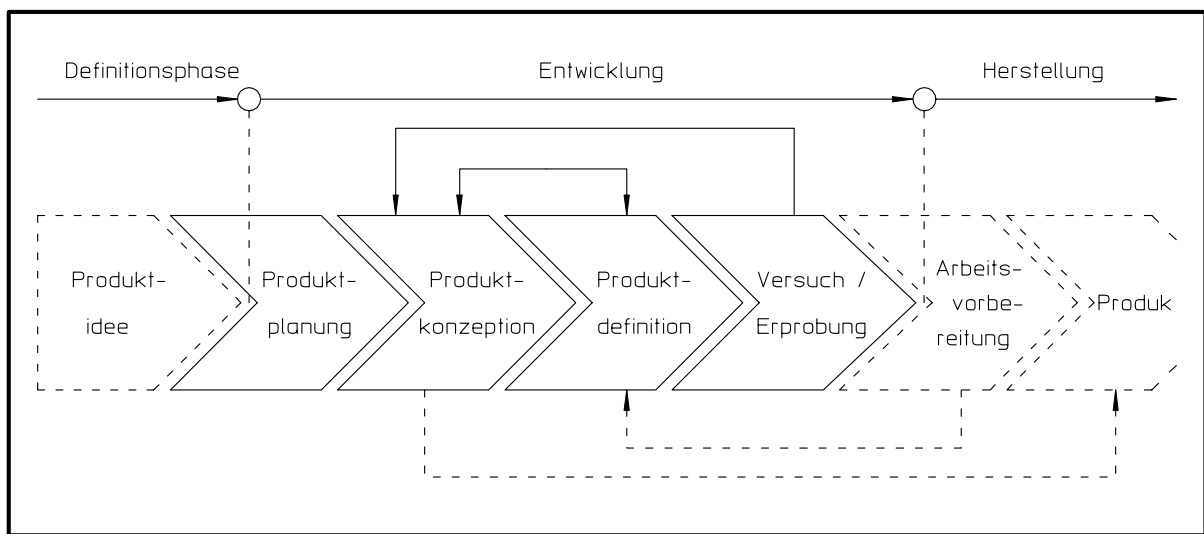


Abbildung 2-1: Phasen des Produktentwicklungsprozess

Mit dem Problemlösungsprozess wird die gesamte konstruktive Ausgestaltung der Produktidee in ein marktreifes Produkt analog zu diesen Detailprozessen (Phasen) sukzessiv bzw. auch iterativ entwickelt. Eine sukzessive Entwicklung eines Produktes beinhaltet nicht, dass die gesamte Entwicklung ohne Rücksicht auf die vorhergehenden und / oder auf die nachfolgenden Detailprozesse durchgeführt werden kann. Vielmehr sind sowohl Wechselwirkungen als auch Rückkopplungen zwischen den einzelnen Detailprozessen nicht zu vermeiden, deren Lösungen häufig eine Vielzahl von Iterationsschritten zur Folge haben. So kann z.B. im Detailprozess Produktion eine problembehaftete Herstellbarkeit eines Einzelteils eventuell zu einer Änderung in dem Detailprozess Produktdefinition führen. Deshalb können im Ergebnis für diesen Sachverhalt die folgenden Aussagen von [1] nur sehr deutlich unterstrichen werden:

„Vorhergehende Schritte müssen immer mit Blick auf nachfolgende Schritte ausgeführt werden (und umgekehrt)!“

„Frühzeitige Abstimmung / Kommunikation erforderlich!“

Die vier zur Produktentwicklung gehörenden Detailprozesse sind durch die nachfolgend wiedergegebenen Inhalte geprägt:

Der Detailprozess Produktplanung kann nicht, wie in der Abbildung 2-1 dargestellt, allein der Phase Entwicklung zugeordnet werden, sondern er ist auch ein Teil einer so genannten Definitionsphase [3], in welcher unter anderem mit Hilfe der Forschung und Vorentwicklung auf der Basis der „Anwendbarkeit von Ideen und Planung der zu entwickelnden Produktidee“ ein am Markt einführbares Produkt bzw. Produktprogramm ermittelt wird und damit eine Produktidee konzipiert wird. Diese „strategische Produktfindung“ gestaltet sich bei den Unternehmen etwas anders, die im eigenen Auftrag entwickeln. Diese Unternehmen werden erst durch eine intensive Marktanalyse die Antworten auf die folgenden Fragen suchen [2]:

- *Was will der Kunde?*
- *Was bietet die Konkurrenz?*
- *Wo gibt es bei uns neue Ideen?*
- *Wer ist unsere Zielgruppe?*
- *Wo im Produktlebenszyklus befinden sich unsere anderen Produkte?*
- *Welchen Nutzen bringt uns das?*

Die Auswertung dieser Antworten führt dann zu den Vorgaben für eine Initiierung der nachfolgenden Phasen.

In der Phase Produktkonzeption wird zunächst eine grobe Beschreibung der Anforderungen an das neu zu entwickelnde Produkt und dessen Produktstrukturen vorgenommen. Diese Anforderungen können sich im Laufe der Produktentwicklungen ändern, wenn sich z.B. die Umsetzung der Anforderungen konstruktiv und / oder fertigungstechnisch nicht realisieren lassen oder die anfangs geforderte Funktionalität für eine optimale Handhabung des Produktes mittels einer durchgeführten Erprobung nicht ausreichend ist. Diese Phase wird anschließend in einzelne Funktionsbereiche gegliedert, für die jeweils verschiedene Lösungsprinzipien auf der Basis physikalischer Effekte gesucht werden. Diese Prinzipien können miteinander verknüpft werden, so dass sich daraus verschiedene Lösungsvarianten ergeben. Liegt eine positive Bewertung einer Variante vor, kann diese eher „abstrakte“ Arbeit und damit diese Phase beendet werden.

In dem Detailprozess Produktdefinition wird die vorab gefundene Lösungsvariante in eine konkrete Beschreibung überführt und es wird die konstruktive Detailausarbeitung für alle Komponenten des Produktes ausgeführt. Dazu gehören unter anderem die Wahl der verfügbaren Werkstoffe und die Ermittlung der dazugehörigen Werkstoff-Kennwerte. Zusammen mit den noch zu ermittelnden äußeren Belastungen kann anschließend die konstruktive Lösung hinsichtlich ihrer Belastungsfähigkeit untersucht werden. Ist diese nicht ausreichend, so ist auch hier häufig eine Rückkopplung nicht zu vermeiden. Im Rahmen dieses Detailprozesses werden auch konstruktive Maßnahmen hinsichtlich eines optisch ansprechenden Designs realisiert.

Um die Produkteigenschaften besser überprüfen zu können, wird in dem Detailprozess Versuch / Erprobung ein Prototyp hergestellt. Dieser Prototyp soll zeigen, dass die eingangs geforderten Funktionalitäten auch tatsächlich erfüllt werden. Obwohl mit den heute verfügbaren IT-Systemen auch kinematische Eigenschaften simuliert werden können, so ist eine Überprüfung dieser Gegebenheiten an einem realen Modell von unschätzbarem Wert. Darüber hinaus kann im Zeitalter des Internet ein Prototyp auch einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt werden, um z.B. das Marktbedürfnis für die hier konzipierte Lösung vor dessen Herstellung ansatzweise zu überprüfen. Des Weiteren kann mit den dort gewonnenen Erkenntnissen und Anregungen der Interessenten die vorgestellte Lösung in einzelnen Details auch noch optimiert werden.

Abschließend ist nun die Frage zu klären, wie die eingangs geforderte „Durchgängigkeit“ in der Produktentwicklung für die einzelnen Detailprozesse in Bezug auf die Aktualität der Produktdaten gewährleistet werden kann. Für die Handhabung des Produktdatenmanagement gibt es eine ganze Reihe von Ansätzen, die sicherlich nicht alle hier diskutiert werden können. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass alle Ansätze auf ein Produktmodell als Basis zurückgreifen. In diesem Produktmodell werden alle in dem Produktentwicklungsprozess entstehenden produktspezifischen Informationen abgebildet. Im Zusammenhang mit einem Produktmodell unterscheiden sich die Ansätze für das Produktdatenmanagement und damit für den Produktentwicklungsprozess. Der Unterschied liegt darin begründet, ob

- ein neutrales Produktmodell oder ob
- ein Produktmodell, welches auf die verschiedenen Dateien der Erzeugersysteme verteilt ist,

zum Einsatz kommt.

## 2.2 Ein neutrales Produktmodell als Basis

In dem Ansatz von [5] wird von einem neuen neutralen Produktmodell ausgegangen, welches als so genanntes Bindeglied zwischen den beteiligten IT-Systemen steht und auf das nun alle am Produktentwicklungsprozess beteiligten IT-Systeme zugreifen können (vgl. **Abbildung 2-2**). Der große Vorteil dieses Ansatzes wird von [5] unter anderem gesehen in einem

- „Kontrollierten Datenaustausch zwischen den beteiligten Programmen. Prozessoren zum Datenein- und Datenauslesen mit entsprechenden Kontrollmechanismen werden zusätzlich notwendig.“ Und darüber hinaus ist
- „nur ein gültiges Datenmodell zu jedem Zeitpunkt vorhanden“ und ein
- „Produktmodell vereint alle möglichen Austauschdateien der beteiligten Programme. Hierfür muss ein Produktreferenzmodell erstellt werden“

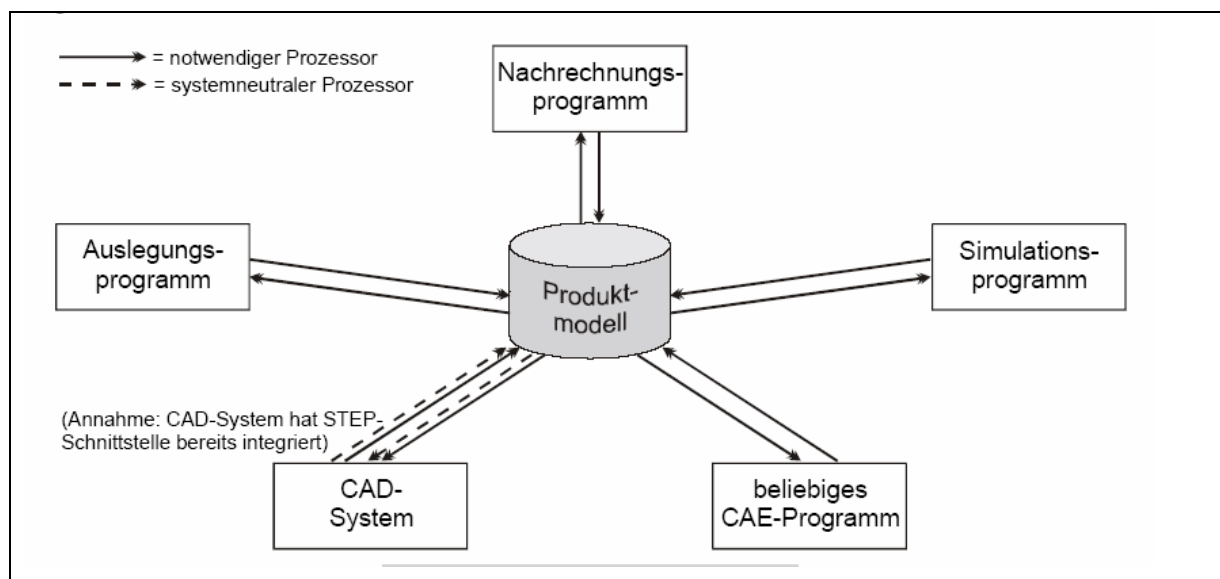


Abbildung 2-2: Datenaustausch mit neutralem Produktmodell (Auszug aus [5])

Durch ein allgemeingültiges Referenzmodell auf der Basis von STEP<sup>1</sup> kann die Anzahl der für einen Datenaustausch notwendigen Pre- und Postprozessoren erheblich verringert werden. Ohne neutrales Produktmodell sind für einen kompletten Datenaustausch zwischen allen Programmen in der Abbildung 2-2 insgesamt jeweils 10 Pre- und Postprozessoren (20 Prozessoren) und jetzt nunmehr 10 Prozessoren notwendig. Verfügen die beteiligten IT-Systeme über eine systemneutrale Schnittstelle (z.B. STEP-Schnittstelle), so verringert sich

<sup>1</sup> STEP = Standard for the Exchange of Product Model Data

die Anzahl noch weiter. Allerdings schränkt eine systemneutrale Schnittstelle die Nutzung eines neutralen Produktmodells doch erheblich ein, da sich die Leistungsfähigkeit der Schnittstelle auf den kleinsten gemeinsamen Nenner aller denkbaren IT-Systeme beschränkt.

Oder aber das für das Produktmodell zu erstellende Referenzmodell beinhaltet alle Vor- und Nachteile der internen Datenmodelle der beteiligten IT-Systeme, wodurch die allgemeingültige Neutralität verloren geht, da für jedes neu hinzukommende IT-System eventuell eine Erweiterung notwendig wird. Denn nur wenn die einzelnen auf das Produktmodell zugreifenden IT-Systeme die gesamten Möglichkeiten ihrer internen Datenmodelle ausschöpfen können, macht eine systemübergreifende Zusammenarbeit Sinn. Die teilweise negativen Auswirkungen eines neutralen Produktmodells sind wahrscheinlich die Gründe, warum sich die Anwendung der STEP-Schnittstelle in den letzten 10 Jahren überwiegend nur in großen Unternehmen wie erwartet durchgesetzt hat. Für kleine Unternehmen ist die erhöhte Aufmerksamkeit bezüglich der Anpassung der Schnittstellen auf Grund von Versionsänderungen der beteiligten IT-Systeme nicht förderlich und darüber hinaus auch mit nicht vorhersehbaren Kosten verbunden.

### **2.3 Nutzung eines Produktmodells aus fachspezifischen Modellen in Dateien**

Ein weiterer Ansatz für das Produktdatenmanagement korrespondiert mit dem Wunsch der Unternehmen, den gesamten Lebenszyklus ihrer Produkte gemäß der Abbildung 1-1 abzubilden. In einem Lebenszyklus entsteht von der Produktidee über die Konstruktion, die Produktion bis hin zu der Entsorgung des Produktes eine große Anzahl von Daten, Dokumenten und Informationen, die alle in den jeweiligen Erzeugersystemen in Dateien gespeichert werden. Der Zugriff und die Verwaltung dieser Informationen ist für die Unternehmen eine große Herausforderung innerhalb eines **Produkt-Lifecycle-Management-Konzeptes** (PLM-Konzept).

Nach [6] ist PLM „ein integrierendes Konzept zur IT-gestützten Organisation aller Informationen über Produkte und deren Entstehungsprozesse über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg, so dass die Informationen zur Verfügung stehen.“ Wie dieses Konzept entlang der Wertschöpfungskette bezüglich der IT-Systeme umzusetzen ist, zeigt beispielhaft das IT-Szenario in der **Abbildung 2-3**. Die Inhalte derartiger Szenarien sind sowohl von dem herzustellenden Produkt und der gegebenen Infrastruktur als auch von der jeweiligen Organisationsstruktur eines Unternehmens abhängig. Die äußerst divergierenden

Ausgestaltungen dieser Kriterien machen deutlich, dass es ein für alle Unternehmen allgemeingültiges IT-Szenario nicht geben kann und somit die dafür notwendigen PLM-Konzepte ebenfalls nicht gleich sein können.

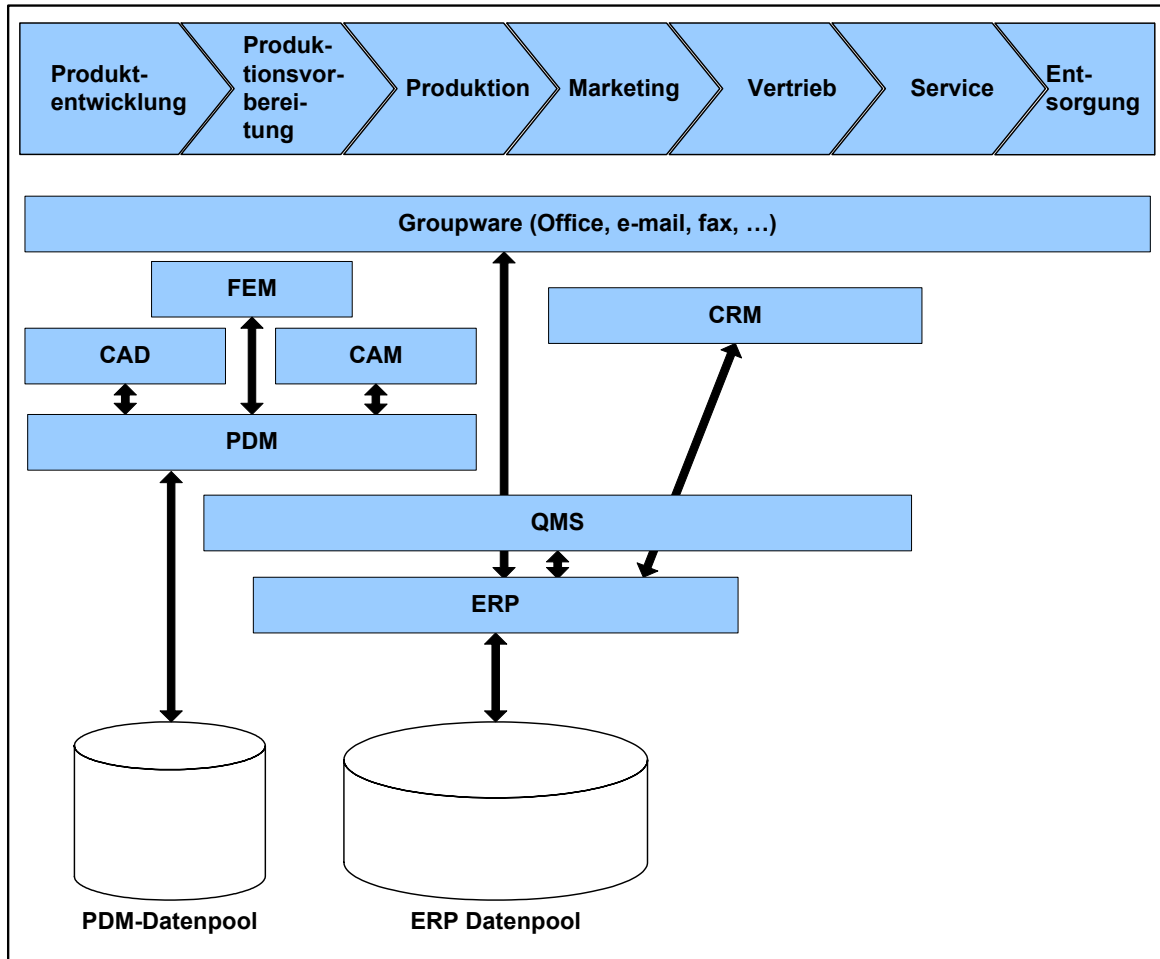


Abbildung 2-3: IT-Szenario [7]

Die hier zum Einsatz kommenden IT-Systeme haben zwar überwiegend alle einen eigenen Datenpool (Datenbank), da diese aber jeweils über ein API<sup>2</sup> verfügen, können diese Systeme mit dessen Hilfe ihre Daten in einen externen Datenpool schreiben und auch aus diesem lesen. Obwohl diese fachspezifischen Modelle (CAD-Modell oder Ersatz-Modell für eine FEM-Berechnung) in den beiden Datenpools auf verschiedene Dateien verteilt sind, kann auch hier im weitesten Sinn von einem Produktmodell gesprochen werden.

<sup>2</sup> API = Application Programming Interface

Nach [7] ist „der parallele Einsatz der zu den Datenpools gehörenden PDM<sup>3</sup>- und ERP<sup>4</sup>-Systeme kein Widerspruch, da die den Anwendungen zugrunde liegenden Funktionen und die sich daraus ergebenden Anwendungsmöglichkeiten unterschiedliche Schwerpunkte besitzen. So wird ein PDM-System primär für die Bereiche Entwicklung und Produktion eingesetzt, da es in erster Linie die für diese Unternehmensbereiche relevanten Informationen verwaltet, wie beispielsweise CAD-Dateien, Design-Definitionen, Material- und Stücklisten und Montage- und Fertigungsanweisungen. Hingegen werden mit einem ERP-System die betriebswirtschaftlichen Ressourcen eines Unternehmens, wie Betriebsmittel, Kapital und Personal, für einen effizienten Betriebsablauf geplant und in definierten Prozessen abgebildet.“

Wenn in einem derartigen PLM-Konzept die einzelnen IT-Systeme unbedingt ihre eigenen Datenverwaltungen einbringen möchten, weil dadurch eventuell für diese Systeme eine bessere Ausnutzung der Produktdaten gegeben ist, so wird ab einer gewissen Anzahl der beteiligten IT-Systeme der erforderliche Integrationsaufwand sehr kompliziert und unübersichtlich. Ebenso kann bei diesen Gegebenheiten die Redundanzfreiheit, so wie diese bei einem neutralen Produktmodell vorliegt, nicht mehr gewährleistet und damit auch eine jederzeitige Aktualität der Produktdaten nicht sichergestellt werden. Letzteres aber ist das herausragende Ziel eines PLM-Konzeptes.

In einer zusammenfassenden Bewertung muss festgestellt werden, dass beide Ansätze die Bearbeitung der Prozesse des gesamten Lebenszyklus im Fokus haben und dass jeder Ansatz Vor- und Nachteile in sich birgt. Die hier zu lösende Aufgabe beschränkt sich aber nur auf die Prozesse der Produktentwicklung, so dass hier eine andere Vorgehensweise möglich ist. Die Ideallösung für ein Produktmodell ist sicherlich, wenn alle beteiligten IT-Systeme unter der Führerschaft eines IT-Systems zu einem gemeinsamen IT-System integriert werden könnten. Eine derartige Integration für die Prozesse der gesamten Wertschöpfungskette gemäß der Abbildung 1-1 würde im Ergebnis zu einem Programm führen, welches ein Volumen annimmt, das niemand mehr bearbeiten und pflegen kann. Hingegen ist eine Integration einzelner IT-Systeme für einen begrenzten Bereich, wie z.B. ein Produktentwicklungsprozess, mit der heute zur Verfügung stehenden Informationstechnologie ohne große Probleme realisierbar.

---

<sup>3</sup> PDM = Produkt Daten Management

<sup>4</sup> ERP = Enterprise Ressource Planing

### 3 Konzept für eine ablaufgeregelte Produktentwicklung

Ein Produkt ist ein in einem Wertschöpfungsprozess geschaffenes Wirtschaftsgut,. Dabei wird nicht danach unterschieden, ob es sich um ein einzelnes Teil oder um eine Baugruppe oder um eine komplexe Anlage handelt. Im Sinne der produzierenden Unternehmen ist ein Produkt ganz allgemein ein fertiges Erzeugnis<sup>5</sup> oder ein produziertes Stückgut, welches in einem Markt zum Gebrauch oder Verbrauch angeboten werden kann und das einen Wunsch oder ein Bedürfnis eines Konsumenten oder Nutzers befriedigt [2]. Auch wenn das Entstehen eines neuen Produktes für ein Unternehmen auf den ersten Blick als sehr Erfolg versprechend erscheint, so wird aber nur dann ein Produktentstehungsprozess von diesem Unternehmen angestoßen, wenn dieses neue Produkt auch technisch machbar ist und deren Entwicklung und Herstellung in die Unternehmensstrategie passt. [8]

#### 3.1 *Software-Architektur für das Konzept*

Das Finden einer Problemlösung bezüglich des Bedarfes für ein Produkt und dessen Umsetzung in das „*technisch Machbare*“ gehört zweifelsfrei zu den Aufgaben der Produktentwicklung. Der Produktentwicklungsprozess ist gemäß der Abbildung 2-1 in mehrere Phasen bzw. Detailprozesse unterteilt, deren Kommunikation sehr stark von einem durchgängigen Informationsfluss abhängig ist. Der zentrale Detailprozess innerhalb der Produktentwicklung ist der Konstruktionsprozess, in welchem durch jeweils aufeinander aufbauende Handlungen ein abstraktes Modell mittels gestalterischer Maßnahmen in einen konkreten Zustand überführt wird. Das dafür notwendige Prozessmodell ist das Produktmodell, welches von den beteiligten Konstrukteuren in einer ersten Stufe aufgebaut und mit jedem Prozessfortschritt solange modifiziert wird, bis das Problem gelöst ist.

Zu dieser Lösungsfindung sind aber, wie bereits ausgeführt, noch weitere Detailprozesse notwendig, die ebenfalls von diesem Produktmodell partizipieren müssen. Das Zusammenwirken aller an der Produktentwicklung beteiligten Detailprozesse stellt nur dann ein Optimum dar, wenn die den Detailprozessen zugrunde liegenden IT-Systeme jeweils über einen Zugriff auf die aktuellen Produktdaten des Produktmodells verfügen.

---

<sup>5</sup> Erzeugnisse sind gemäß DIN 6789 in sich geschlossene, aus einer Anzahl von Gruppen und / oder Teilen bestehende funktionsfähige Gegenstände (z.B. Maschinen, Geräte) als Fertigungsergebnis.



Um die in den Kapiteln 2.2 und 2.3 angesprochenen Probleme bezüglich der Nutzung eines Produktmodells auszuschließen, wird in dem hier vorgelegten Konzept auf die Generierung von Schnittstellen zur Datenübertragung soweit wie möglich verzichtet. Das Konzept ist so aufgebaut, dass die IT-Systeme, die zeitnah miteinander kommunizieren müssen, sich gegenseitig aufrufen, das heißt, aktivieren können und somit auch auf die jeweils erzeugten Produktdaten direkt zugreifen können (vgl. **Abbildung 3-1**).

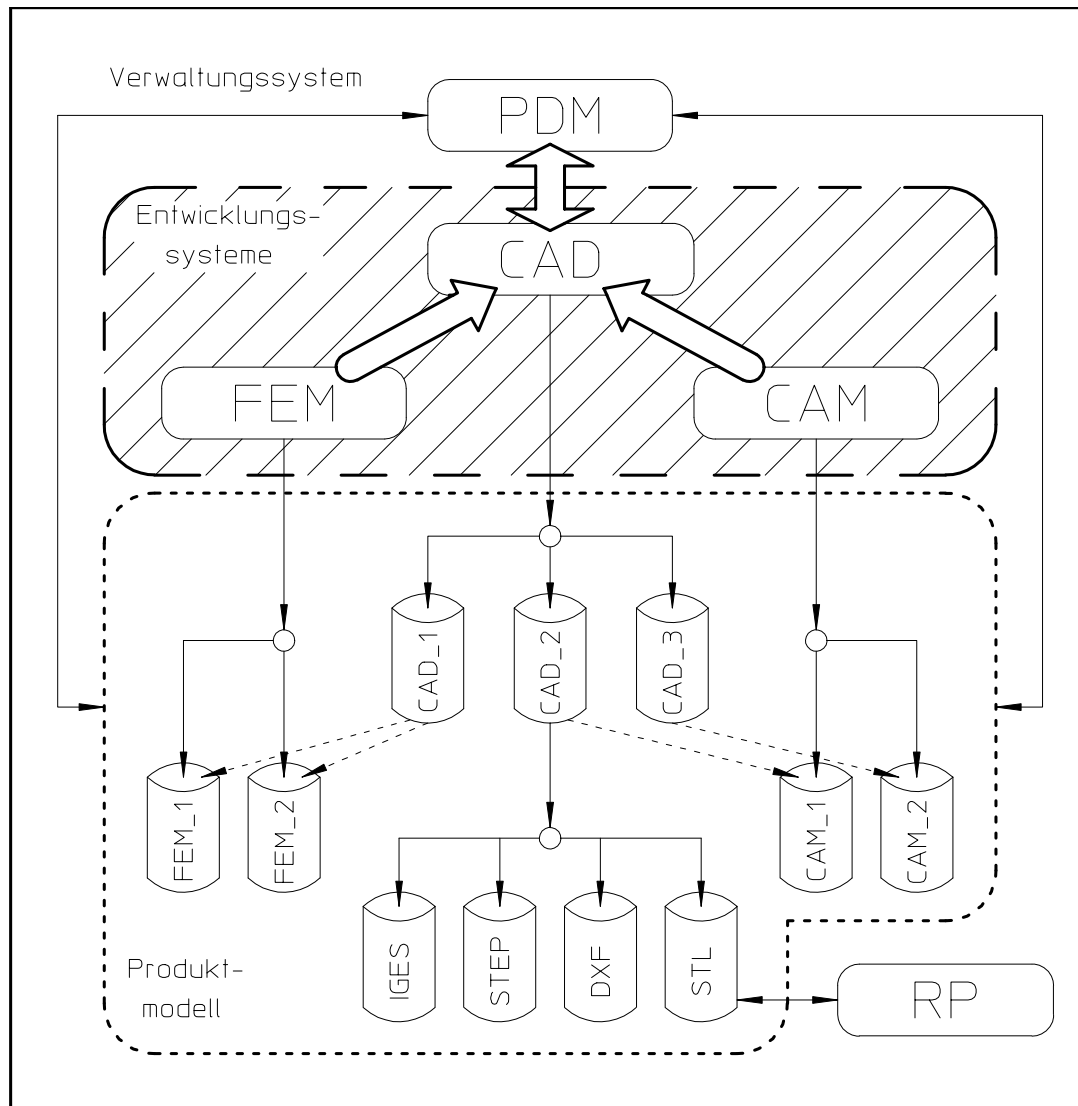


Abbildung 3-1: Integration der IT-Systeme für eine ablaufgeregelte Produktentwicklung

In Analogie zu der Konzeption in Kapitel 2.3 sind in der Abbildung 3-1 auszugsweise einige Dateien, die von den an der Produktentwicklung beteiligten IT-Systeme erzeugt werden, als gemeinsames Produktmodell in einem Rahmen grafisch zusammengefasst. Durch die gegenseitigen Verweise von den Systemen auf die Dateien (z.B. CAD\_1, CAD\_2) und den Verweisen zwischen den Dateien (CAD\_1 auf FEM\_1 und FEM\_2) ist gewährleistet, dass

von jedem Entwicklungs-System auf jede einzelne Datei zugegriffen werden kann, sofern eine Verweis-Kette von dem System zu der gewünschten Datei vorliegt.

Die Produktentwicklung wird im Wesentlichen von den beiden IT-Systeme **CAD** und **FEM** getragen, wobei mittels CAD die konstruktive Gestaltung vorgenommen und durch FEM die Haltbarkeit des konstruierten Produktes überprüft wird. Hierbei ist das CAD-System als Ausgangssystem zu sehen, aus welchem das FEM-System aufgerufen wird und durch die hier vorhandenen Verweise auf die erzeugten Dateien ist ein gegenseitiger Zugriff auf die Dateien der beiden Systeme gegeben.

Um mögliche negative Wechselwirkungen in der Wertschöpfungskette (vgl. Abbildung 2-1) so früh wie möglich zu vermeiden, kann aus dem CAD-System heraus auch ein **CAM**<sup>6</sup>-System aufgerufen werden, um die Fertigung einzelner Komponenten bereits in der Entwicklungsphase zu simulieren. Durch die partielle Integration der beiden Systeme ist auch hier ein Zugriff auf das Produktmodell garantiert.

Für den Fall, dass die Produktentwicklung bereichsübergreifend oder sogar unternehmensübergreifend durch die Bildung von so genannten virtuellen Konstruktionsteams erfolgen soll, liegen die einzelnen Dateien, die das Produktmodell beinhalten, nicht mehr in den gleichen Verzeichnissen vor [9]. In diesem speziellen Fall ist der Einsatz eines **PDM**-Systems als Verwaltungssystem für die Produktdaten und damit für die Zusammenfassung der Dateien zu einem gemeinsamen Produktmodell erforderlich. Die in einem PDM-System verfügbare Funktionalität ermöglicht diesem System einen uneingeschränkten Zugriff auf alle Dateien und kann somit allen beteiligten Entwicklungssystemen eine jederzeitige Aktualität der von ihnen benötigten Produktdaten gewährleisten.

Neben den Softwaresystemen CAD, FEM, CAM und PDM, für die jeweils eine partielle Integration realisiert ist, werden für eine Produktentwicklung noch weitere IT-Systeme benötigt. Da diese einerseits nicht für jede Produktentwicklung gleichermaßen erforderlich sind und andererseits die von diesen Systemen benötigten Ergebnisse nicht unbedingt in einem zeitlich engen Rahmen benötigt werden, reicht hier die Schaffung einer Datenschnittstelle aus, die eine Ein- und Ausgabe der Produktdaten mittels allgemeingültig definierter Schnittstellenformate, wie STEP, IGES, DXF oder STL, an ein externes System erlaubt. Als Beispiel ist in der Abbildung 3-1 der Zugriff einer externen Software auf die

---

<sup>6</sup> CAM = Computer aided Manufacturing

Produktdaten im STL<sup>7</sup>-Format für die Erstellung eines Prototyps mittels eines RP<sup>8</sup> - Verfahrens dargestellt.

Die hier gezeigte Softwarearchitektur garantiert allen beteiligten IT-Systemen für den Prozessfortschritt in der Produktentwicklung eine jederzeitige Nutzung der jeweils aktuellen Produktdaten. Gleichzeitig bildet diese Softwarearchitektur die Grundlage zur Straffung des Produktentwicklungsprozesses, in dem darauf aufbauend nachfolgend ein Konzept für eine ablaufgeregelte Produktentwicklung formuliert werden soll, damit für den Vorgang des Problemlösungsprozesses die Anzahl der Iterationen möglichst klein gehalten werden kann.

### **3.2 Darstellung der ablaufgeregelten Produktenwicklung**

Für eine optimale Entwicklung eines Produktes reicht es nicht aus, eine Softwarearchitektur zu schaffen, die durch eine hohe Integration geprägt ist, sondern um die eingangs erwähnten Rückkopplungen und Wechselwirkungen innerhalb eines Produktentwicklungsprozesses auf ein Minimum zu reduzieren, ist zusätzlich eine Vorgabe hinsichtlich des Ablaufes dieses Prozesses äußerst hilfreich. Grundsätzlich erfordert ein Produktentwicklungsprozess eine sukzessive Vorgehensweise, indem zunächst gemäß der Abbildung 3-1 eine Konstruktion mit Hilfe eines CAD-Systems entwickelt wird, die anschließend hinsichtlich ihrer Machbarkeit überprüft werden muss. Dazu gehört in erster Linie ein Berechnungsprogramm (z.B. ein FEM-System), welches den erforderlichen Festigkeitsnachweis für die Haltbarkeit des Produktes liefert. Um negative Wechselwirkungen zu der Produktion zu vermeiden, kann z. B. auch vorab eine Überprüfung hinsichtlich einer gesicherten Fertigung mit Hilfe eines CAM-Systems simuliert werden. Diese Überprüfungen erfordern bei einer Nichterfüllung der geforderten Randbedingungen Änderungen bzw. Optimierungen der eingangs erstellten Konstruktion.

Dieser Näherungsprozess ist ohne die heute verfügbare Informationstechnologie nur mit extrem hohem Zeitaufwand zu realisieren. Gleichgültig, wie sich die zunehmende Qualität der IT-Systeme und der sich daraus ergebende Nutzen für die Produktentwicklung auch dargestellt, ist nach [10] trotzdem „die Notwendigkeit methodischen Vorgehens“ erforderlich, das sich „einerseits aus der Beschränktheit des menschlichen Gedächtnisses und andererseits aus der Komplexität von Produkten und ihren Erstellungsprozessen ergibt“. Dieses methodische Vorgehen lässt sich mit den Mitteln der Systemtechnik erreichen.

---

<sup>7</sup> STL =Standard Tessalation Language

<sup>8</sup> RP = **R**apid **P**rototyping

Da die von den Konsumenten gewünschten Produkte immer komplexer werden, kann mit Hilfe der Systemtechnik der Produktentwicklungsprozess einfacher gestaltet werden, indem ein Gesamtsystem durch eine klare Strukturierung in Teilsysteme mit dem dazugehörigen In- und Output aufgeteilt wird, mit dem Ziel, die mathematische Modellierung eines Produktes und dessen anschließende konstruktive Gestaltung zu bewerkstelligen. Bei der Systemgestaltung muss allerdings darauf geachtet werden, dass nicht der Anwender sich dem technischen System anpassen muss, sondern das System muss weitgehend die Schwächen und Eigenschaften des Anwenders berücksichtigen [10].

Nach [10] ist der Begriff des Systems in allgemeiner Form gemäß der **Abbildung 3-2** definiert, indem ein System aus einer Vielzahl von Elementen besteht, die selbst wiederum ein System sein können. Die Elemente verfügen über Eigenschaften und sind außerdem über Beziehungen miteinander verknüpft. Ein System ist zwar gegenüber der Umwelt durch eine Systemgrenze abgekapselt, aber die von dem System erwartete Funktionalität wird durch einen Eingang eingeleitet und führt durch eine entsprechende systeminterne Verarbeitung im Ergebnis zu einem Ausgang.

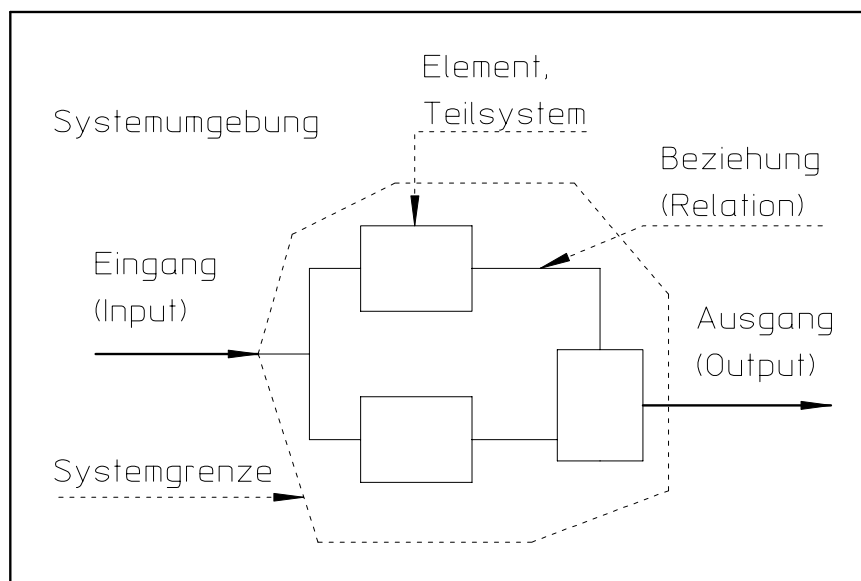


Abbildung 3-2: Darstellung eines Systems [10]

Das erzielte Ergebnis muss aber nicht unbedingt den erhofften Erwartungen entsprechen. Deshalb müssen weitere Mechanismen benutzt werden, die eine Problemlösung unterstützen. Der Nutzer eines Systems wird sich bei seiner Lösungsfindung an bestimmten Vorstellungsbildern orientieren und das Ergebnis dann mit den an das System gestellten Anforderungen überprüfen, ob das Ziel erreicht ist. Bei Nichterfüllung folgt nach [10] daraus: „Das Problemlösen geschieht durch eine zyklische Abfolge von Prüfschritten (Test) und

Generierungs- oder Veränderungsschritte (**Operate**) oder anders ausgedrückt: von Analyse bzw. Bewertungs- und von Syntheseschritten.“ Erst wenn mit dem Ergebnis die geforderte Ausgangssituation erfüllt ist, kann das Problem als gelöst (**Exit**) betrachtet werden. [10] definiert diesen Vorgang als so genanntes TOTE-Schema (vgl. **Abbildung 3-3**), das prinzipiell einem Regelkreis entspricht, der so lange durchlaufen wird, bis ein zufriedenstellender Vergleich von IST zu SOLL erreicht wird oder seitens des Benutzers eine Unterbrechung gefordert wird.

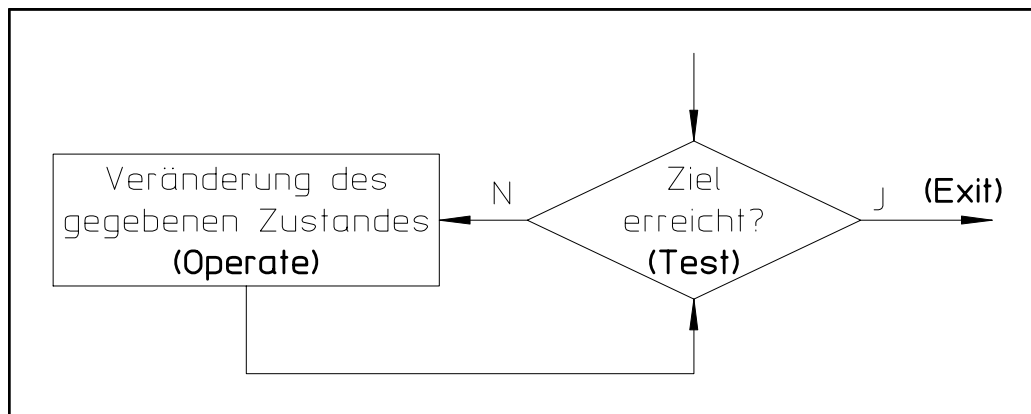


Abbildung 3-3: Das TOTE-Schema [10]

Mit Hilfe des TOTE-Schemas kann der Produktentwicklungsprozess entlang der Wertschöpfungskette und unter Einbeziehung der Möglichkeiten der in Abbildung 3-1 dargestellten Systemarchitektur in eine ablaufgeregelte Folge von Teilprozessen gegliedert werden. Der gesamte Produktentwicklungsprozess wird durch eine vorab bestimmte Aneinanderreihung von Black-Box-Darstellungen (einfache Funktion mit einem Eingang und einem Ausgang) und TOTE-Schemata übertragen, wobei die Abarbeitung allgemein verschachtelt (rekursiv) von Teilprozess zu Teilprozess erfolgt. Der Wechsel zwischen den einzelnen Teilprozessen bleibt dabei nicht dem Zufall überlassen, sondern orientiert sich an den erreichten Teillösungen bis hin zu einer Gesamtlösung.

Auf der Basis dieser Elemente aus der Systemtechnik (Abbildung 3-3) und unter der Berücksichtigung der umfassenden Softwareintegration gemäß der Abbildung 3-1 lässt sich der gesamte Ablauf des Produktentwicklungsprozesses gemäß der **Abbildung 3-4** bearbeiten. Hierbei wird deutlich, dass der Ablauf zwar sukzessiv, aber nicht linear abgearbeitet wird, sondern die angesprochenen Rückkopplungen und Wechselwirkungen sind nicht zu übersehen. Entweder der Prozess wird zu einem beliebigen Zeitpunkt unterbrochen und später fortgesetzt oder aber das Problem ist endgültig gelöst und das Ergebnis wird dem Prozess „Arbeitsvorbereitung“ als Nachfolgeprozess der Produktentwicklung übergeben.

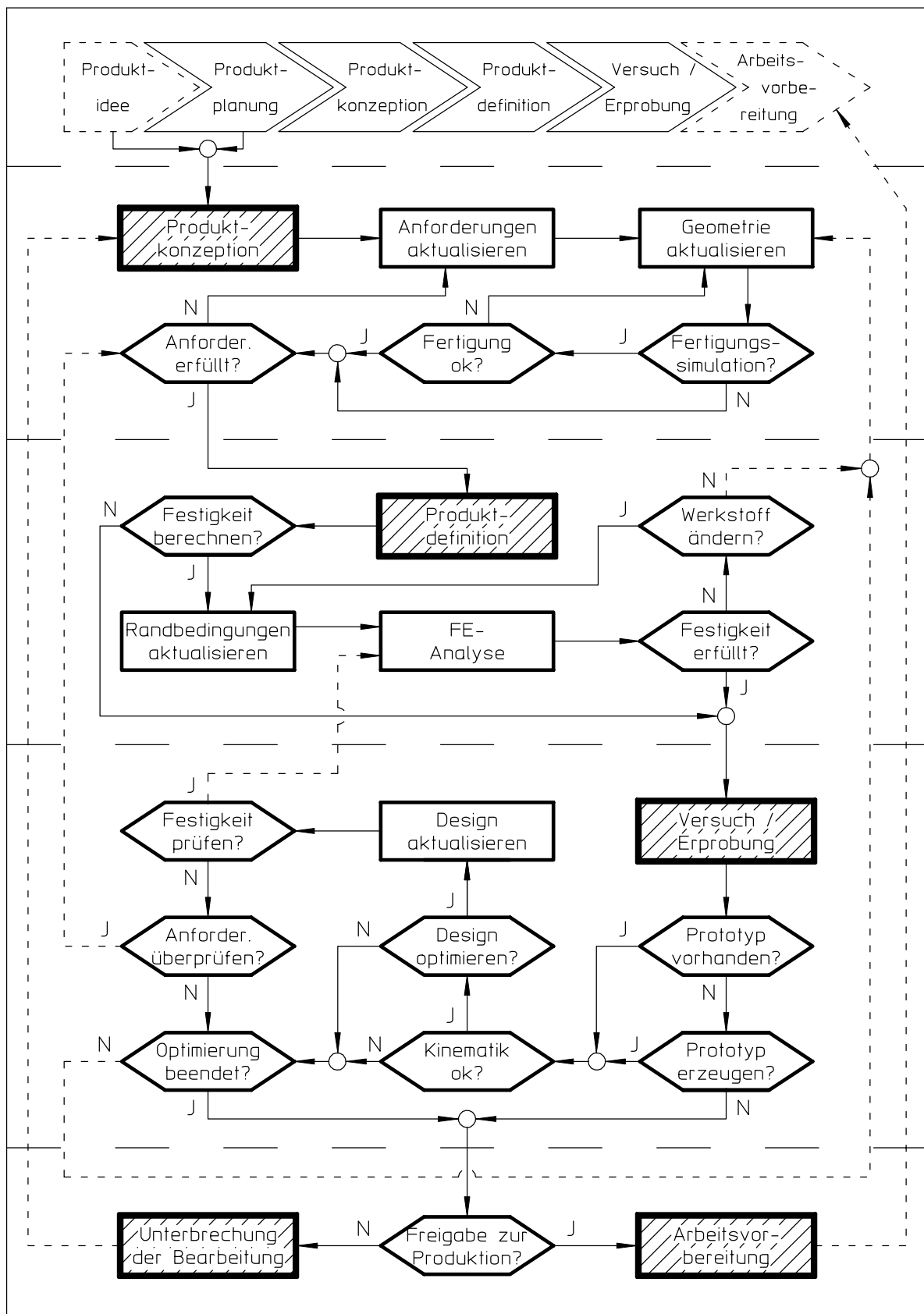


Abbildung 3-4: Ablaufgeregelter Produktentwicklungsprozess

Im Einzelnen werden die folgenden Phasen bearbeitet:

1. Wenn eine Produktidee gefunden ist, dann kann im
2. Detailprozess Produktkonzeption die konstruktive Gestaltung Produkt-Komponenten mit Hilfe eines **3D-CAD-Systems** generiert und solange modelliert werden, bis diese den gewünschten Voraussetzungen entsprechen. Anschließend werden die nun vorliegenden CAD-Daten des 3D-Modells im
3. Detailprozess Produktdefinition online für die Festigkeitsberechnungen mit Hilfe der **FEM-Software** genutzt. Im
4. Detailprozess Versuch / Erprobung wird mittels eines **Rapid Prototyping Verfahren** auf der Basis des selektiven Lasersinterns durch die Nutzung der 3D-CAD-Daten ein Prototyp erstellt. An Hand dieses Prototyps kann die gesamte Funktionalität überprüft werden und bei eventuell auftretenden Defiziten können diese in eine Optimierung des Produktes einfließen. Diese Optimierung kann als so genannte Rückkopplung in den vorherigen Detailprozessen erarbeitet werden. Je nach der Art und Weise der Änderungen beginnt diese
5. Optimierung entweder in dem Detailprozess Produktkonzeption oder in dem Detailprozess Produktdefinition. Nach der Beendigung der Optimierung erfolgt die
6. Freigabe zur Produktion.

Die integrierten Softwaresysteme benutzen alle ein auf Dateien basierendes Produktmodell, so dass hier keinerlei Daten-Schnittstellen notwendig sind. Durch den Zugriff auf jederzeit aktuelle Produktdaten sind die bereits angesprochenen und realisierten Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Phasen der Produktentwicklung möglich. Die sich aus der Bearbeitung ergebenden Rückkopplungen stellen durch die vorhandene gemeinsame Benutzeroberfläche ebenfalls kein Problem dar.

Die weiteren Prozesse „Produktionsvorbereitung“, „Produktion“, „Marketing“, „Vertrieb“, „Service“ und „Entsorgung“ gemäß der Abbildung 1-1, die zu einer fertigungstechnischen Umsetzung der Lösung in ein wirtschaftlich vermarktbare Produkt führen, können auf die gleiche Art und Weise in das Konzept eingebunden werden, sind aber nicht Gegenstand der formulierten Aufgabenstellung. Im Übrigen sind diesbezüglich an anderer Stelle hinreichend genaue Aussagen getroffen worden, so dass auf weitere Erläuterungen verzichtet werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit werden moderne Softwareprodukte eingesetzt, welche die gestellten Aufgaben intensiv unterstützen. Dabei ist darauf zu achten, dass die eingesetzten

Softwareprodukte einen hohen Grad der Integration besitzen, damit seitens der Bearbeiter des Produktentwicklungsprozesses kein manueller Datenaustausch zwischen den Systemen vorgenommen werden muss, um unnötige Fehlermöglichkeiten zu vermeiden. Im Wesentlichen handelt es sich um die drei Bereiche Konstruktion, Berechnung und Fertigung, wobei die Konstruktion den Bereich innerhalb der Produktentwicklung darstellt, der das Anfangsgerüst des Produktmodells liefert, welches anschließend von der Konstruktion und allen anderen Bereichen benutzt und verändert werden kann. Im Folgenden werden die dafür benötigten Softwarekomponenten ausgewählt und deren Funktionalitäten kurz diskutiert.

Neben den vorgestellten IT-Komponenten gibt es eine Vielzahl von ähnlichen Softwareprodukten, die ebenfalls für die anstehenden Aufgaben genutzt werden können. Für die vorgestellten Komponenten spricht einerseits, dass der Verfasser dieser Arbeit auf eine jahrelange Erfahrung im Umgang mit diesen Produkten zurückgreifen kann und andererseits bieten diese Komponenten durch das Vorhandensein von gegenseitigen Schnittstellen untereinander den Vorteil, dass diese Softwareprodukte einen reibungslosen Informationsaustausch gewährleisten.

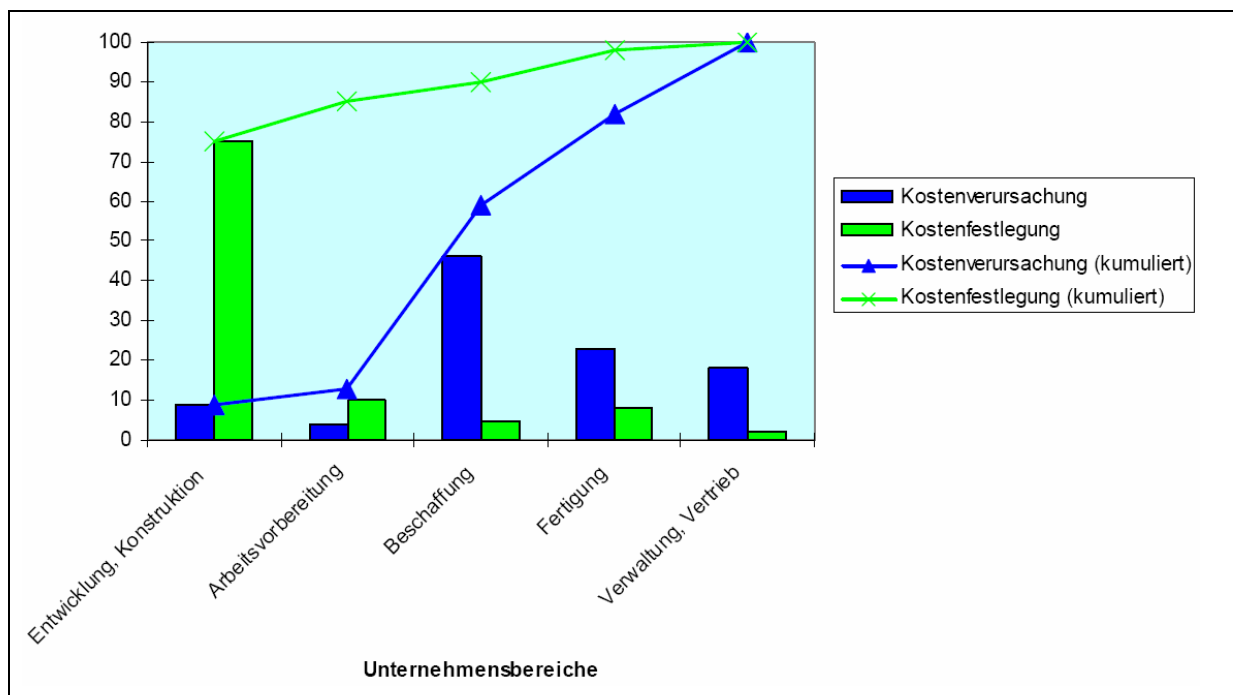


Abbildung 3-5: Kostenverursachung und Kostenfestlegung [11]

Die Entwicklung eines neuen Produktes darf sich nicht nur an den Wünschen der Konsumenten hinsichtlich einer guten Funktionalität, einer optimalen Handhabbarkeit oder an dem zu erzielenden Preis orientieren, sondern sowohl die benötigten Kosten für die



Entwicklung als auch alle übrigen Kosten werden einen wesentlichen Einfluss auf das zu erwartende Unternehmensergebnis ausüben. Für die Beurteilung dieses Ergebnisses ist aber besonders interessant, welcher Unternehmensbereich hinsichtlich des gesamten Lebenszyklus eines Produktes die meisten Kosten festlegt. Dies ist gemäß der **Abbildung 3-5** die „Entwicklung, Konstruktion“ und damit ist auch klar, dass dieser Bereich und damit das CAD-System bezüglich des IT-Konzeptes gemäß der Abbildung 3-1 die Führung übernehmen muss.

Zur Formulierung des Teil-Konzeptes für die Ablaufregelung des Produktentwicklungsprozesses gemäß der Abbildung 3-4 in Verbindung mit der Abbildung 3-1 ist es zunächst sinnvoll, die hier beteiligten IT-Systeme hinsichtlich ihrer Eignung für das Konzept kurz zu diskutieren. Da am Institut für Ingenieurinformatik der Universität Essen mehrere wissenschaftliche Arbeiten einen Benchmarktest für verschiedene IT-Systeme entlang der Wertschöpfungskette beinhalten, kann auf dies Erfahrung zurückgegriffen und damit auf eine Auswahl der für dieses Konzept benötigten IT-Systeme verzichtet werden. Des Weiteren ist in diesem Zusammenhang zu bemerken, dass für die hier geforderte Integrationstiefe nur eine begrenzte Anzahl von IT-Systemen zur Verfügung steht.

### **3.3 Konstruktion als Kernprozess innerhalb der Produktentwicklung**

Die konstruktive Gestaltung eines Produktes steht in der Produktentwicklung eindeutig im Vordergrund, so dass das im Konstruktionsbereich eingesetzte IT-System mit der höchsten Priorität in einem Systemverbund zu bewerten ist. Alle weiteren IT-Systeme, die für die Produktentwicklung benötigt werden und deren Ergebnisse zeitnah zum Fortschritt der Entwicklungsarbeit notwendig sind, müssen sich aus diesem führenden System heraus starten lassen und können somit auf das gleiche Produktmodell zugreifen. Für die Systeme, deren Ergebnisse keinem zeitlichen Zugriff unterliegen, muss nur die Möglichkeit gegeben sein, dass die Ausgabe der Produktdaten in der für diese Systeme notwendigen Verarbeitungsform vorliegt. [12]

Für die Konstruktion haben sich mittlerweile in nahezu allen Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus CAD-Systeme als effektive Werkzeuge etabliert. Auf Grund des rasanten Fortschritts im gesamten IT-Umfeld haben sich die CAD-Systeme von den reinen 2D-Zeichnungssystemen zu integrierten Entwicklungswerkzeugen weiterentwickelt, welche eine dreidimensionale Darstellung von Bauteilen erlauben und in der Lage sind, Informationen an andere Systeme weiterzuleiten, welche ebenfalls für die Produktentwicklung benötigt

werden. So können die Daten eines CAD-Modells direkt als Eingabe für ein FEM- oder CAM-System verwendet werden. Dadurch werden sowohl zeitaufwändige Mehrfacheingaben als auch mögliche Fehlerquellen beim Informationstransfer vermieden. Da in allen Fällen die Ursprungsdaten aus einem CAD-System stammen, ist die Auswahl des CAD-Systems für den konkreten Anwenderfall besonders wichtig. [13]

Da innerhalb der ablaufregelten Produktentwicklung sowohl die konstruktive Gestaltung als auch die festigkeitsgerechte Nachprüfung vorgenommen wird, muss das zum Einsatz kommende 3D-CAD-System eine solche Arbeitsweise unterstützen. Die modernen CAD-Systeme, die heute im Maschinenbau eingesetzt werden, sind zum überwiegenden Teil parametrische beziehungsweise feature-basierte 3D-Volumenmodellierer. Hinsichtlich der Softwarearchitektur sind die führenden Systeme in den wesentlichen Bereichen vergleichbar. Unterschiede existieren hauptsächlich in Bezug auf die Benutzeroberfläche und die Integration von Zusatzapplikationen für weitergehende Bearbeitungen.

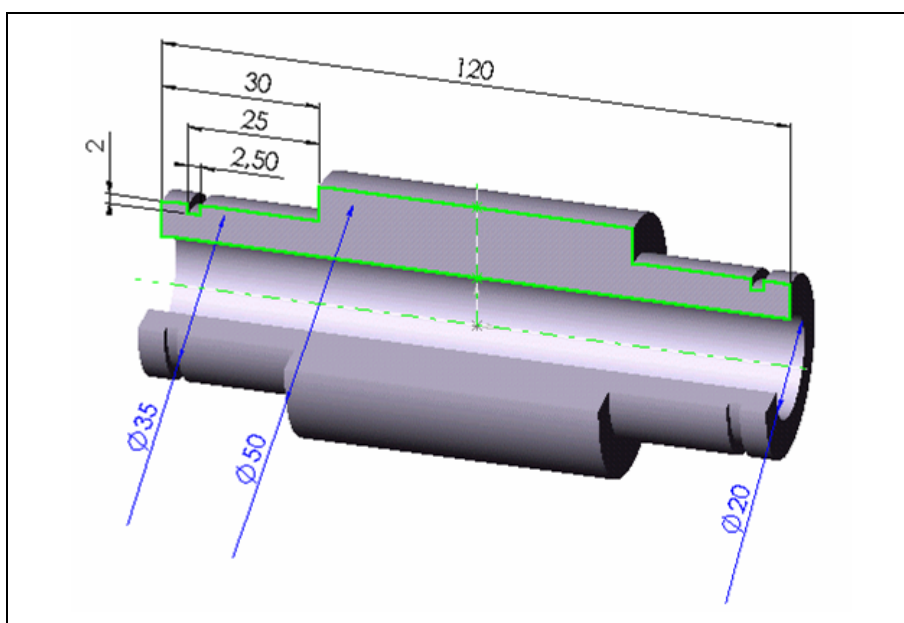


Abbildung 3-6: Erzeugung eines 3D-Bauteils mit Hilfe von Skizzen [12]

Aus der Vielzahl von Eingabemöglichkeiten in das 3D-System sollen hier 2 Eingabeformen kurz aufgezeigt werden. Mit dem **Erzeugen einer komplexen Skizze** wird z.B. eine vorhandene Symmetrie ausgenutzt. Deshalb muss nur eine Hälfte des Wellenquerschnitts gezeichnet werden, die anschließend um eine Achse rotiert und somit automatisch einen 3D-Körper erzeugt (vgl. **Abbildung 3-6**). Diese Vorgehensweise unterstützt in hohem Maße eine nachträgliche Änderung der Konstruktion, da hier nur jeweils das Ausgangsprodukt, die Skizze, korrigiert werden muss, um eine neue Konstruktion zu erlangen.

Im Gegensatz zu der zuvor beschriebenen Vorgehensweise kann derselbe Körper auch durch aufeinander **aufgesetzte Grundkörper** generiert werden. Hierbei wird das zu konstruierende Ergebnis aus Grundkörpern, so genannten Features, aufgebaut. In diesem speziellen Fall wird ein Grundkörper jeweils durch eine Kreis-Geometrie beschrieben und linear ausgetragen (vgl. **Abbildung 3-7**). Die Geometrie-Beschreibung mittels der aufgesetzten Grundkörper ist gegenüber der Erzeugung mit einer komplexen Skizze schwieriger und auch nachträgliche Änderungen an der Geometrie erfordern einen höheren Aufwand. Da es sich aber bei den Grundkörpern um Feature handelt, können diese später leichter ausgeblendet werden und auch die Weiterverarbeitung für den Bereich der Fertigung gestaltet sich einfacher, da durch die Art der Geometriebeschreibung der Fertigungsverfahren nachempfunden ist [12].

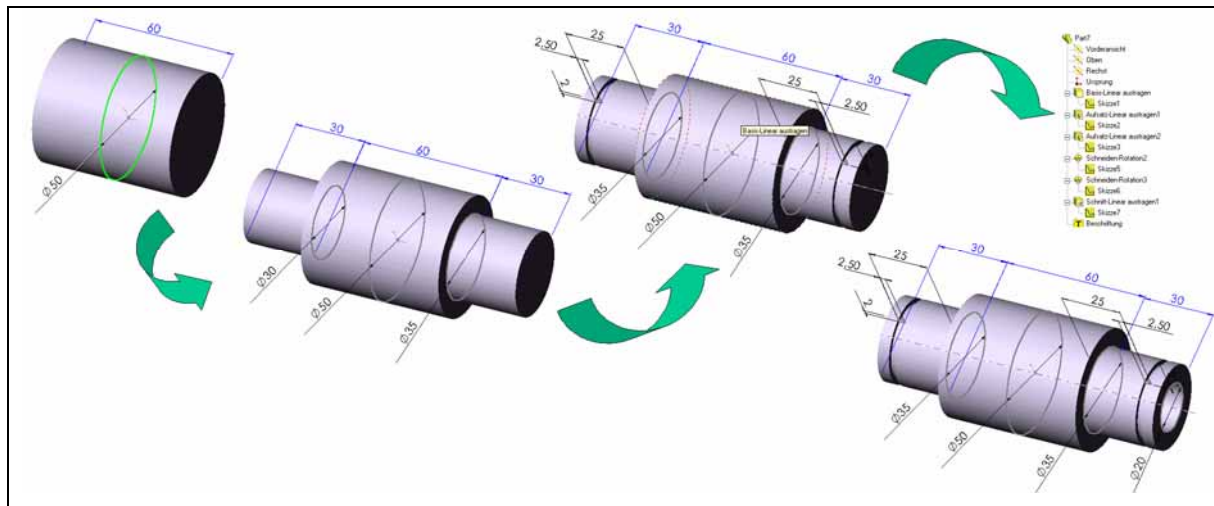


Abbildung 3-7: Erzeugung eines 3D-Bauteils mit Hilfe von Grundkörpern [12]

Da der Verfasser bereits über weitgehende Kenntnisse des Systems SolidWorks aus dem Hause Dassault Systems verfügt, und da dieses System zu den führenden CAD-Systemen im Bereich der mechanischen Konstruktion gehört, wird dieses System für den Einsatz zur Konzepterstellung ausgewählt. Solid Works ist ein parametrisches, featurebasierendes Volumenmodelliersystem der neuesten Generation [6]. Der Funktionsumfang umfasst neben den Standard-Modellierfunktionen auch spezielle Handhabungsmethoden, die das Erstellen komplexer Einzelteile und Formenbaumodelle sowie den Umgang mit großen Baugruppen sehr gut unterstützen (vgl. **Abbildung 3-8**). Ebenso gehört die Konstruktion von Blechteilen und deren Abwicklungen zum Leistungsumfang dieses Standardproduktes.

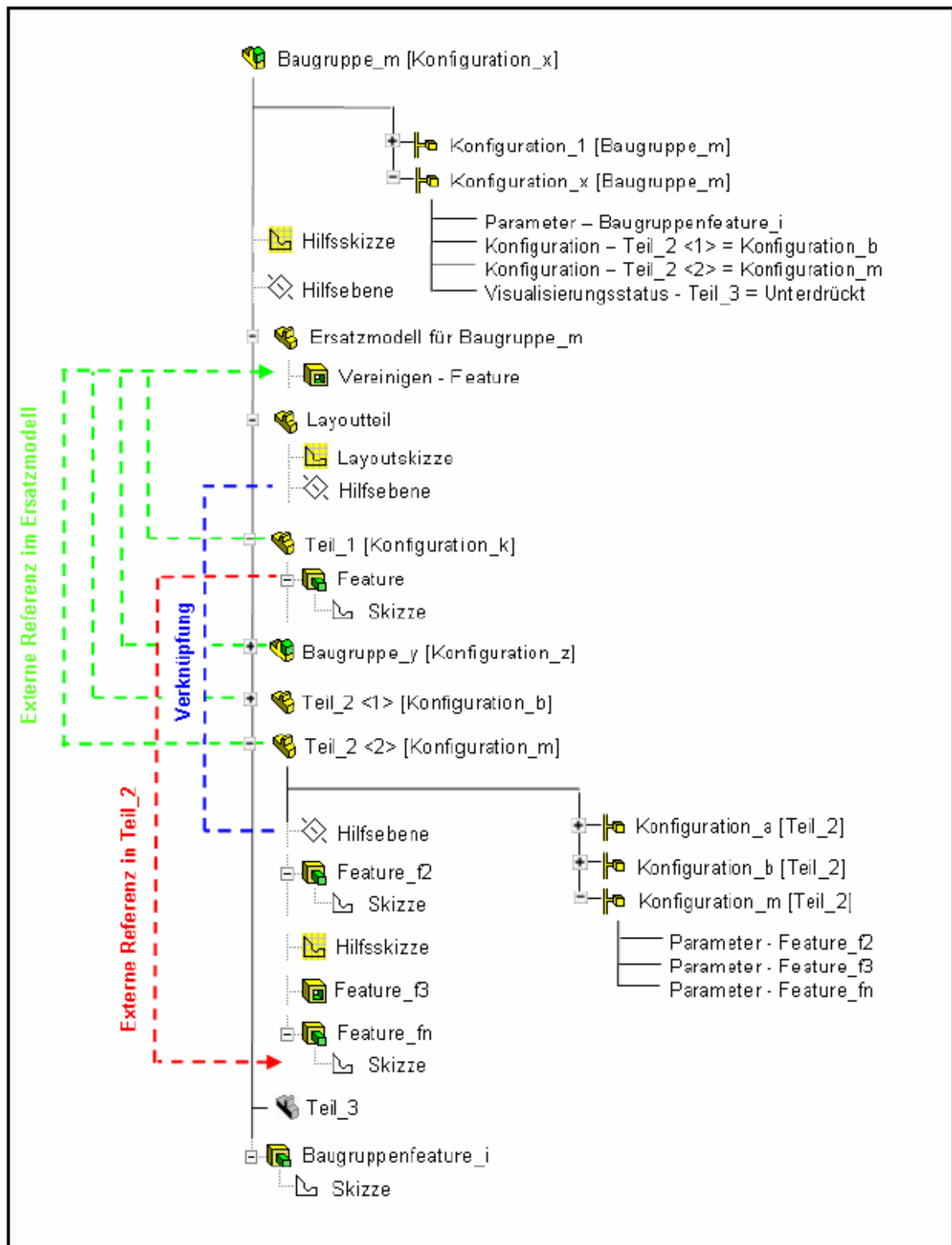


Abbildung 3-8: Übersicht über die CAD-Elemente in SolidWorks [12]

SolidWorks wurde speziell für die Betriebssystemplattform Microsoft Windows entwickelt und ist daher voll in das Betriebssystem integriert [14]. Dies äußert sich sowohl in einer

intuitiven Benutzeroberfläche, als auch in der problemlosen Integration von anderen Windows-Anwendungen, wie beispielsweise der Tabellenkalkulation Microsoft-Excel. Darüber hinaus gibt es weitere Softwarekomponenten für die Bereiche Fertigung und Simulation, die innerhalb der Programmoberfläche von Solid Works eingesetzt werden können. Ein herausragendes Merkmal des Systems SolidWorks, welches nicht zu unterschätzen ist, stellt die einfache Erlernbarkeit und die intuitive Benutzeroberfläche dar. Dies führt zu einer steilen Lernkurve und ermöglicht dem Konstrukteur bereits nach einer kurzen Einarbeitungszeit eine produktive Nutzung des Systems.

Die Ableitung von normgerechten Konstruktions- oder Fertigungszeichnungen erfolgt automatisch an Hand des 3D-Modells, wobei das CAD-System selbständig eine Aktualisierung der 2D-Zeichnungen bei Änderungen an den 3D-Modelldaten vornimmt. Sowohl bei der Baugruppenerstellung als auch bei der Zeichnungserstellung werden keine redundanten Daten erzeugt, da lediglich die Pfade zu den verknüpften Modellen gespeichert werden.

SolidWorks basiert auf dem bereits seit langem auf dem Markt erprobten Parasolid-Kern. Die integrierten Standardschnittstellen, wie zum Beispiel **STEP**, **IGES**, **ACIS**, **STL**, bieten die Möglichkeit des Datenaustausches mit einer großen Zahl anderer CAD-Systeme sowie die direkte Übergabe von Modelldaten an Rapid-Prototyping-Systeme.

### **3.4 Berechnung des Festigkeitsnachweises mit FEM**

Für die Durchführung von Festigkeitsberechnungen steht mit der **Finite Elemente Methode** (FEM) ein Hilfsmittel zur Verfügung, welches eine rechnergestützte Simulation von Belastungen eines Bauteils ermöglicht. Mit Hilfe von FEM-Systemen können alle physikalischen Probleme berechnet werden, die durch Differentialgleichungen beschreibbar sind (vgl. **Abbildung 3-9**). Gängige Einsatzgebiete sind Festigkeits- und Versagensanalysen, aber auch die Simulation von Strömungsproblemen oder thermischen Belastungen.

Der prinzipielle Ablauf einer FEM-Berechnung beruht auf der Aufteilung eines geometrischen Modells in eine Vielzahl von primitiven Elementen, welche an Knotenstellen miteinander verbunden werden. Auf diese Art wird die exakte Kontur eines Modells angenähert. Dieser Vorgang wird als Vernetzung bezeichnet. Da das physikalische Verhalten eines einzelnen Elementes bekannt ist, erfolgt die Berechnung des gesamten Netzes als Kopplung der Einzelberechnungen der Elemente. Dem Modell werden Randbedingungen und Belastungen

hinzugefügt; im Falle einer Festigkeitsberechnung sind dies beispielsweise Einspannungen und angreifende Kräfte [16].

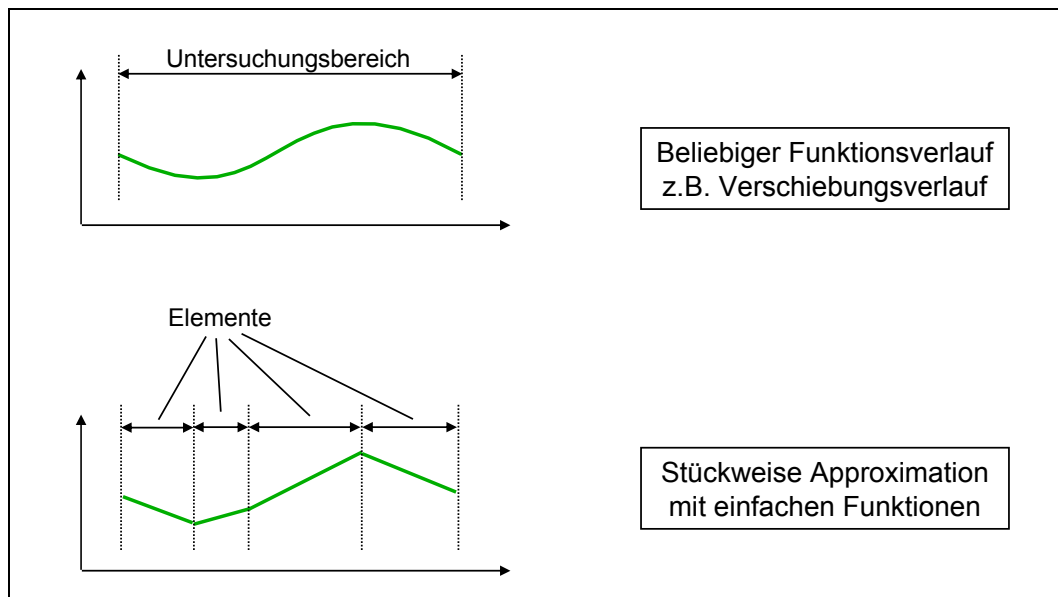


Abbildung 3-9: Idee der Finite-Elemente-Methode [16]

Die Genauigkeit der Berechnung hängt neben einer der Problemstellung und Geometrie angepassten Vernetzung in hohem Maße von der Anzahl der verwendeten Elemente und von der Art dieser Elemente (vgl. **Abbildung 3-10**) ab. Moderne FEM-Systeme sind in der Lage, die Bauteilgeometrie von einem CAD-Modell zu übernehmen. Innerhalb des FEM-Systems werden in der Folge nur noch die bereits angesprochenen Randbedingungen und Lasten eingegeben, die für die Berechnung erforderlich sind. Auch die grafische Darstellung der Ergebnisse kann wieder innerhalb des CAD-Systems erfolgen. Es ist daher sinnvoll, ein FEM-System zu verwenden, welches tief in das parallel benutzte CAD-System integriert ist, damit eine solche Arbeitsweise umgesetzt werden kann.

Mit dem FEM-Berechnungssystem COSMOS/Works steht eine Applikation zur Verfügung, die vollständig in das CAD-System SolidWorks integriert ist. Mit diesem System können Festigkeitsprobleme analysiert werden, wobei die Durchführung von Festigkeitsanalysen (Ermittlung von Verschiebungen und Spannungen), Eigenfrequenzanalysen und Knick- bzw. Beulanalysen möglich ist. Auf Grund der vollständigen Einbettung in das CAD-System gehören auch Analysen von Baugruppen mit Kontaktstellen zum Leistungsumfang. Der Funktionsumfang des FEM-Systems gestattet darüber hinaus je nach Ausbaustufe die Formoptimierung unter Berücksichtigung von dynamischen Reaktionen und gestattet somit auch Ermüdungsanalysen von Bauteilen. [17]

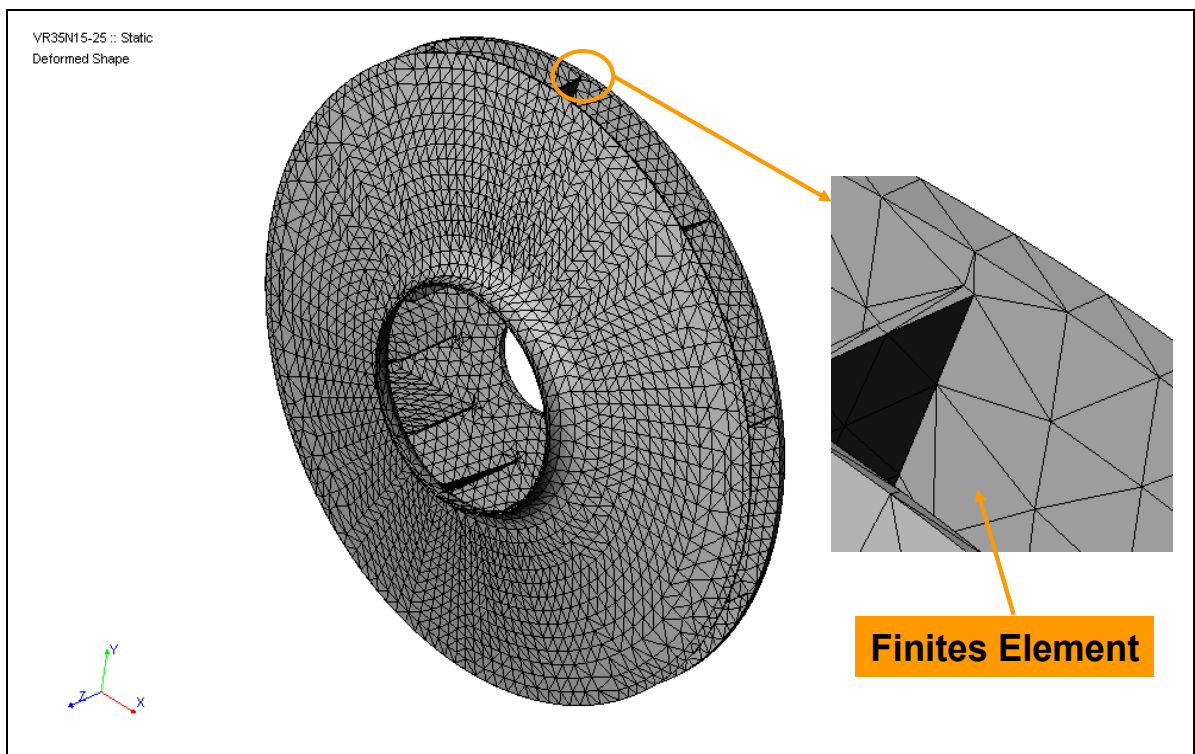


Abbildung 3-10: Vernetztes FE-Modell eines Radialventilators [16]

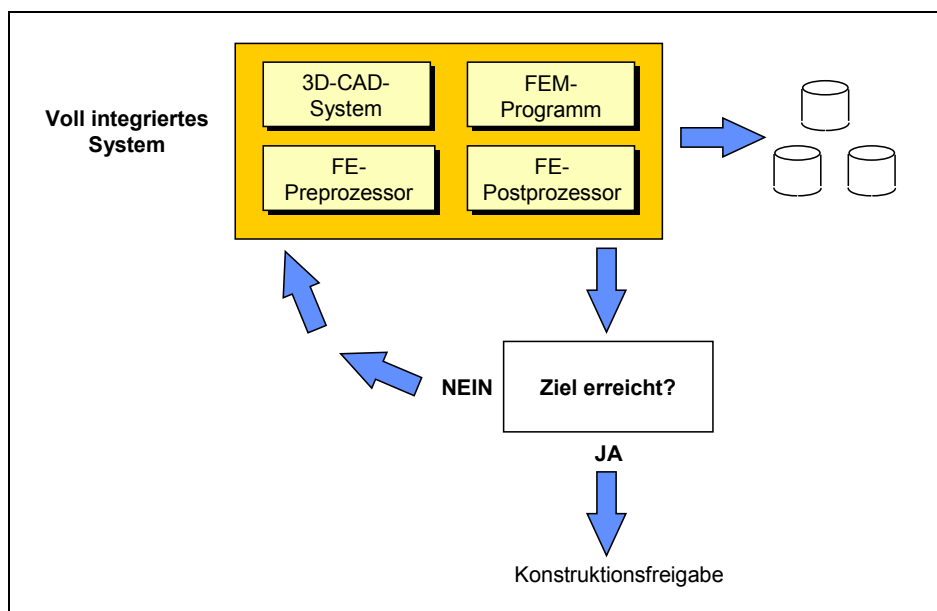


Abbildung 3-11: FEM als Bestandteil eines integrierten Konstruktions- und Berechnungsprozesses [16]

Einen besonderen Vorteil der ausgewählten FEM-Software stellt die Assoziativität von CAD- und FEM-Daten dar (vgl. **Abbildung 3-11**). Alle FEM-spezifischen Parameter, wie Randbedingungen und Belastungen, werden nicht in einer separaten Steuerdatei, sondern direkt

innerhalb der Modelldaten definiert und in der CAD-Datei gespeichert. Eine Änderung der Modellgeometrie führt automatisch zu einer Anpassung der assoziativen FEM-Parameter. Die Darstellung der Simulationsergebnisse erfolgt ebenfalls innerhalb des CAD-Systems. Es besteht darüber hinaus die Möglichkeit, Visualisierungen der Berechnungsergebnisse in neutralen Dateiformaten zu speichern.

### **3.5 Fertigungssimulation eines 3D-CAD-Modells mit CAM**

Mit dem IT-System CAM (**C**omputer **A**ided **M**anufacturing) steht eine Software zur Verfügung, welche die Lücke zwischen der Konstruktion und der Fertigung schließt. Hierbei werden nicht die mit CAD generierten 3D-Modelldaten in Form von Zeichnungen oder Fertigungsunterlagen auf Papier ausgegeben, sondern hier werden alle fertigungsrelevanten Informationen des 3D-Modells mit Hilfe einer NC-Programmierung aufbereitet und deren Ergebnis wird online zur Steuerung einer Fertigungsmaschine genutzt. Unter Aufbereitung ist hier das Hinzufügen von fertigungsspezifischen Informationen zu den bereits vorhandenen geometrischen Merkmalen zu verstehen. Je nach Installation kann diese Aufbereitung sehr verschieden ausfallen. So ist z.B. ein Abgleich einer CAD-Zeichnung mit einer Stückliste eines PPS-Systems möglich oder das Hinzufügen der Daten für den Werkzeugbedarf, die Aufspannung des Werkstückes oder die Reihenfolge der Bearbeitung.

Mit einem CAM-System lassen sich heute die wichtigsten Fertigungsverfahren automatisieren, so z.B. das 2 ½-D Fräsen, das 3D-Fräsen, das Drehen und das Drahterodieren. Insbesondere die 3D-Bearbeitung von komplexen 3D-Modellen ist im Rahmen dieser Arbeit von besonderem Interesse, obwohl die endgültige Fertigung eines Bauteils oder einer Komponente im Rahmen der ablaufgeregelten Produktentwicklung nicht vorgesehen ist. Da aber eine Fertigungs-Simulation zur Überprüfung der Herstellbarkeit eines Bauteils im Konzept berücksichtigt ist, sollte das einzusetzende CAM-System alle Möglichkeiten des 3D-Fräsens beinhalten.

Damit eine zeitnahe ablaufgeregelte Produktentwicklung möglich ist, muss das CAM-System vollständig in das hier eingesetzte CAD-System integriert sein, das heißt, die beiden IT-Systeme müssen über eine gemeinsame Benutzeroberfläche verfügen. Ebenso sollten alle 2D- und 3D-Geometrien, die für eine NC-Bearbeitung verwendet werden, vollständig assoziativ zu dem 3D-CAD-Modell sein. Diese Assoziativität von CAM zu CAD kann im tatsächlichen Fertigungsfall helfen, Fehler zu vermeiden und erleichtert darüber hinaus die Aktualisierung bereits gefertigter Teile.



Bezüglich des hier geforderten Einsatzes für eine Fertigungssimulation muss allerdings angemerkt werden, dass die Benutzung einer CAM-Software für einen Konstrukteur ohne entsprechende Kenntnisse nicht unbedingt zu einer gesicherten Aussage bezüglich der Herstellbarkeit eines Bauteils führen muss. Dies liegt darin begründet, dass für eine Frässimulation immer die „richtige“ Frässtrategie ausgewählt werden muss, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Die gewählte Frässtrategie beinhaltet unter anderem die Werkzeugauswahl, die Reihenfolge der Verfahrenswege, die zu erzielende Oberflächengüte oder die Berücksichtigung von Hinterschneidungen.

Da aber in diesem Konzept der Schwerpunkt nicht in der Fertigung, sondern in der Konstruktion und der Berechnung liegt, soll durch eine Simulation nur beantwortet werden, ob das Bauteil auch wirklich gefertigt werden kann und nicht, wie ein optimales Fertigungsergebnis erzielbar ist. Damit ist die „richtige“ Wahl der Frässtrategie von untergeordneter Bedeutung. In diesem Zusammenhang wird für die Fertigungssimulation das CAM-System SolidCAM ausgewählt, da dieses System eine nahtlose Benutzeroberfläche zu SolidWorks bietet und eine vollständige Assoziativität zu den Konstruktionsdaten von SolidWorks besitzt. [18]

### **3.6 Produktdatenverwaltung bei verteilten Standorten mit PDM**

Ein Produktentwicklungsprozess in einem Unternehmen kann nicht isoliert von dem übergeordneten Produktentstehungsprozess betrachtet werden, zumal dieser den gesamten Lebenszyklus eines Produktes im Fokus hat. Für die reine Produktentwicklung eines Konstruktionsteams ist der Einsatz eines PDM-Systems nicht unbedingt notwendig, obwohl mit einem PDM-System auch in dieser Konstellation eine erhebliche Erleichterung für einzelne Konstruktionstätigkeiten gegeben ist. Wenn aber mehrere Konstruktionsteams an unterschiedlichen Orten an einer Anlage gemeinsam arbeiten, so genanntes verteiltes Arbeiten, ist ohne den Einsatz eines PDM-Systems eine jederzeitige Aktualität der Produktdaten für die beteiligten Konstruktionsteams kaum zu gewährleisten. [9]

Ein manueller Abgleich ist in diesem Zusammenhang allein durch die Tatsache möglich, dass die einzelnen Teams ihre CAD-Daten nicht mehr in einem gemeinsamen Verzeichnis speichern, sondern jeweils in ihren eigenen Verzeichnissen. Darüber hinaus muss während einer Bearbeitung sichergestellt sein, dass zu irgendeinem Zeitpunkt immer nur ein Mitarbeiter Änderungen an einem ganz bestimmten CAD-Modell vornimmt. Diese und ähnliche Probleme können mit dem Einsatz eines PDM-Systems nicht auftreten, da die

vorhandene Funktionalität der PDM-Systeme sowohl den korrekten Abgleich der CAD-Daten als auch deren Aktualität jederzeit gewährleistet.

Darüber hinaus bieten PDM-Systeme einen weiteren erheblichen Vorteil, indem bei Änderungen einzelner Bauteile sofort alle Projekte ermittelt werden können, in denen dieses Bauteil verwendet wird. Ebenso kann der Konstrukteur eine Aussage darüber erhalten, wie sich die aktuelle Änderung auf andere Projekte auswirkt. Umfangreiche Such- und Anzeigefunktionen für die vorhandene Produktstruktur unterstützen zusätzlich die Wiederverwendbarkeit einzelner Bauteile, was zwangsläufig zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit und zu einer Verbesserung der Qualität der Produkte führt.

In diesem Konzept wird das PDM-System SmarTeam berücksichtigt, da es sich sehr schnell implementieren, skalieren und anpassen lässt und darüber hinaus viele branchenspezifische Standards beinhaltet. Die Integration mit dem CAD-System SolidWorks stellt ebenfalls kein Problem dar. [19]

### **3.7 Herstellung eines Prototypen**

Unter **Rapid Prototyping (RP)** wird der Vorgang der weitgehend automatischen Herstellung eines physikalischen Modells eines Bauteils verstanden. Dazu werden in der Regel die Daten eines 3D-CAD-Modells verwendet. Diese können analog zu NC-Daten von den verschiedenen Rapid Prototyping Maschinen interpretiert werden. Auf diese Weise können Prototypen quasi per Knopfdruck an Hand eines CAD-Modells gefertigt werden. Das eigentliche Rapid-Prototyping System besteht in diesem Zusammenhang immer aus der Maschine und der Steuerungssoftware. Im Hinblick auf die Auswahl der geeigneten Softwarekomponenten für das Konzept ist vor allem die Schnittstelle von CAD zu RP von Bedeutung.

Grundlage für eine rechnergestützte Herstellung eines Prototypen mit einer Rapid-Prototyping-Anwendersoftware ist ein mittels eines 3D-CAD-Systems generiertes 3D-Volumenmodell (vgl. **Abbildung 3-12**). Mit geeigneten Postprozessoren wird das CAD-Modell zunächst konvertiert und somit die Datenübergabe vorbereitet. Als neutrales Datenaustauschformat hat sich im Bereich des Rapid Prototyping das STL<sup>9</sup>-Format durchgesetzt. Mit dieser Eingabedatei wird innerhalb der RP-Software eine Zerlegung des Modells in

---

<sup>9</sup> STL: **S**tereolithographic **L**anguage. Dies ist zwar kein standardisiertes Verfahren, hat sich jedoch in der Praxis durchgesetzt.

Schichten gleicher Dicke vorgenommen, die anschließend gefertigt und in einem Fügeprozess wieder zu einem realen Modell zusammengefügt werden.

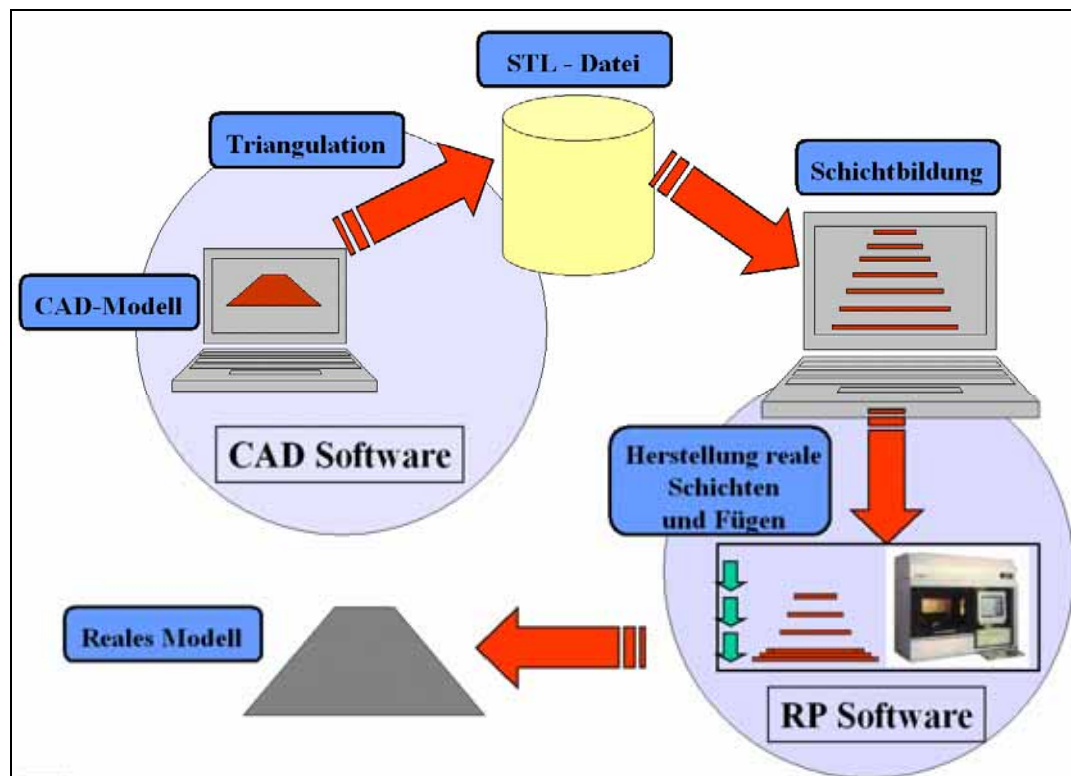


Abbildung 3-12: Prozess der Prototypenherstellung [20]

Bei den generativen RP-Verfahren ist der grundsätzliche Ablauf gemäß der Abbildung 3-12 immer durch die gleichen Arbeitsschritte gekennzeichnet. Diese sind nach [20]:

- Erstellung eines 3D-Modells unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Rapid Prototyping-Verfahrens mit Hilfe eines 3D-CAD-Systems.
- Konvertierung dieses Modells in eine Datei in einem neutralen Austauschformat, welches in der Regel das STL-Format ist.
- Einlesen der STL-Datei in die Anlagensoftware der Rapid-Prototyping-Maschine. Hier wird das Modell in Schichten gleicher Dicke aufgetrennt.
- Sequentielle Herstellung der Schichten und Fügen der Schichten zu einem Körper.

Wie die Abbildung 3-12 zeigt, ist auch hier die Integration der beiden beteiligten Systeme CAD und RP von größter Wichtigkeit, um ein optimales Ergebnis auf der Seite der Fertigung zu erzielen. Da allerdings die Daten der Modellerstellung in dem CAD-System nicht in der gleichen Form für die Schichtermittlung innerhalb der RP-Software genutzt werden können, müssen die CAD-Daten in das STL-Format durch eine Annäherung des Körpers durch Triangulation (vgl. **Abbildung 3-13**) überführt werden. Die Annäherung geschieht durch eine

Facettierung der Körperoberfläche mittels Dreiecksflächen, wobei sich die Genauigkeit der Approximation der Geometrie durch die Anzahl der Dreiecksflächen steuern lässt. Die Qualität der Güte des facettierten Modells lässt sich beeinflussen durch die Anzahl der Dreiecksflächen und durch den Sehnenfehler, der bei der Annäherung an gekrümmte Oberflächen auftritt.

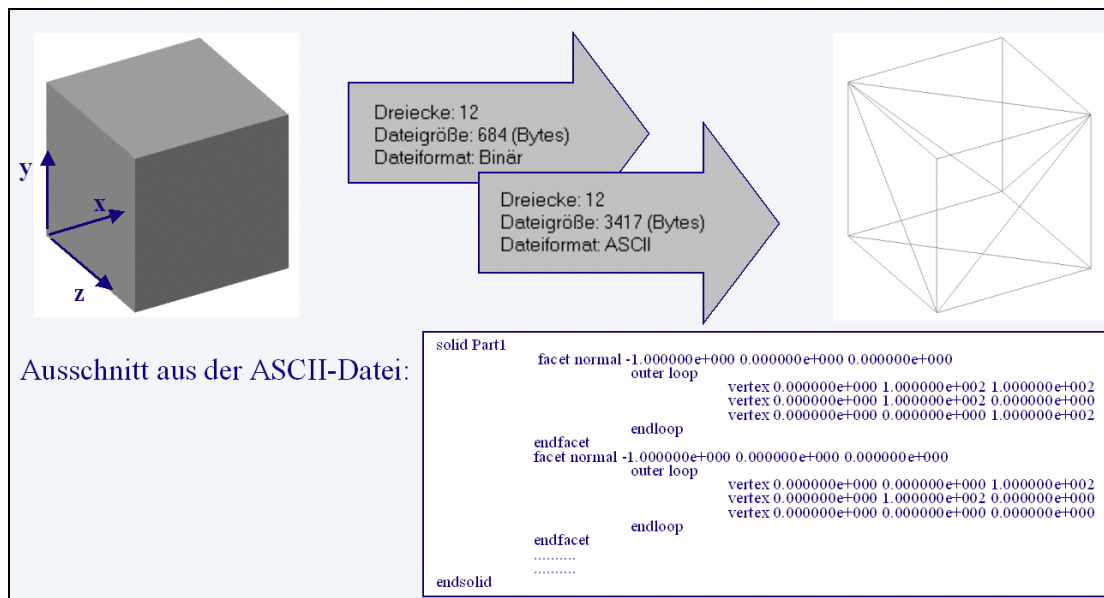


Abbildung 3-13: Triangulationsverfahren bei der Konvertierung in STL [20]

Das ausgewählte CAD-System SolidWorks beinhaltet eine Standard-STL-Schnittstelle, welche eine Übergabe der Daten an ein RP-System gestattet. Da die Herstellung des Prototypen nicht den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet, soll hier nicht weiter auf die eventuell auftretenden Probleme eingegangen werden, wie sie auch bei der Daten-Konvertierung bei anderen Dateischnittstellen zwischen zwei IT-Systemen auftreten können.

Mittlerweile existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Herstellungsverfahren, welche für verschiedene Anwendungsbereiche im Prototypenbau eingesetzt werden. Eine tiefergehende Betrachtung dieser Verfahren kann der Fachliteratur entnommen werden. In der Folge wird lediglich das Verfahren durch selektives Lasersintern vorgestellt, da dieses auch für die Herstellung eines Boots-Prototypen verwendet wird. Das selektive Lasersintern ist vom Ablauf her der Stereolithographie sehr ähnlich.

Wie in **Abbildung 3-14** dargestellt, entsteht auch hier der Prototyp auf einer Teileplattform, die nach jedem Bearbeitungsintervall um eine Schichtdicke abgesenkt wird. Die schichtweise Materialzugabe wird durch die Versinterung eines pulverförmigen Materials durch

Energiezufuhr erreicht. Der wesentliche Unterschied zur Stereolithographie ist dadurch gegeben, dass hier verschiedene Werkstoffe genutzt werden können. So können Formsand auch thermoplastische Kunststoffe oder Metallpulver verwendet werden.

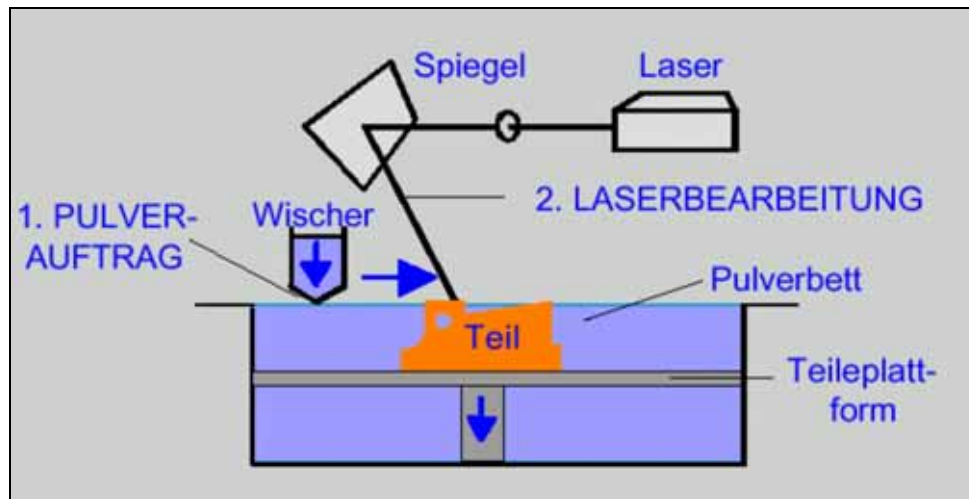


Abbildung 3-14: Prinzip des Selektiven Lasersinterns [20]

Während die Verwendung von Stützkonstruktionen beim selektiven Lasersintern nicht notwendig ist, muss eine Nachbearbeitung der Bauteile aus technologisch bedingten Gründen vorgenommen werden. So kommt es durch die Erwärmung häufig zu einem Anschmelzen von benachbartem Pulver, was zu „Anbackungen“ führt und damit Qualitätsverluste des Modells zur Folge hat. Ein weiteres Problem sind die Veränderungen der geometrischen Abmessungen infolge einer Schrumpfung der Bauteile während des Sinterns. Die Lösung dieses Konfliktes durch Minimierung der Effekte ist heute in der Praxis noch nicht abschließend gelöst [20].

### 3.8 Gewählte IT-Systeme für das Konzept

Nachfolgend sei hier noch einmal auf die tatsächlich ausgewählten IT-Systeme hingewiesen. In der **Abbildung 3-15** ist die Benutzeroberfläche von SolidWorks dargestellt, in welcher momentan das CAM-System SolidCAM gestartet worden ist, um in den Zylinder eine Spiralnute einzufräsen. Neben dem Aufruf von SolidCAM ist auch der Funktionsaufruf für das IT-System COSMOSWorks zu erkennen.

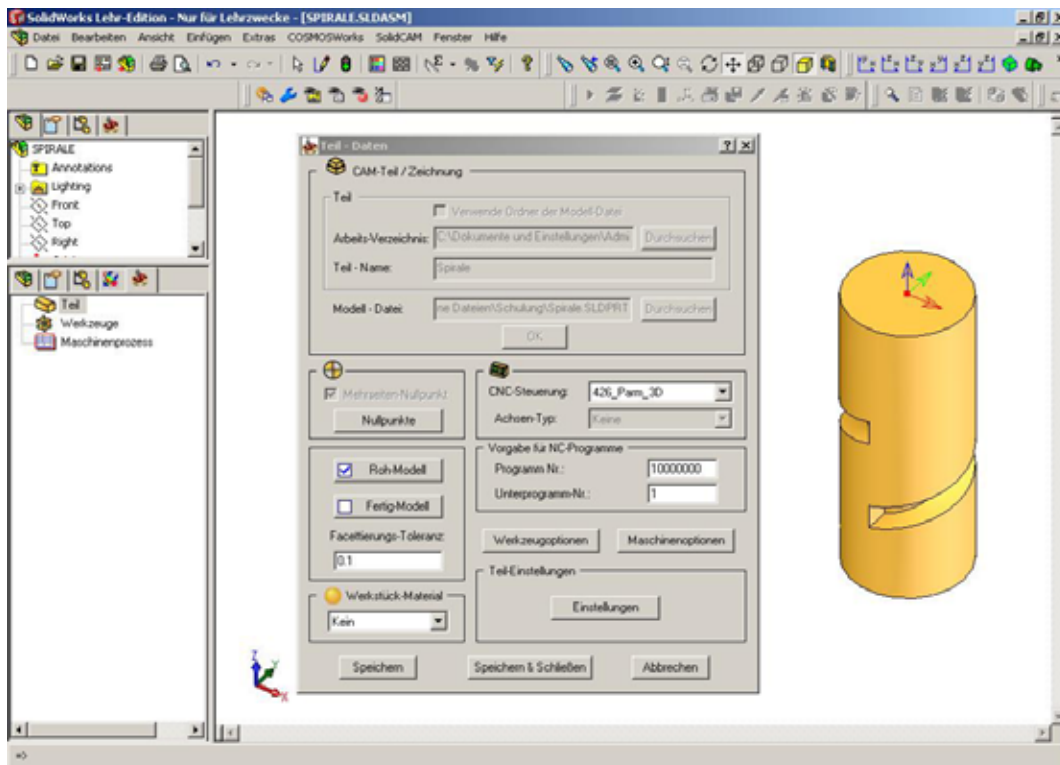


Abbildung 3-15: Benutzeroberfläche von SolidWorks mit integriertem SolidCAM

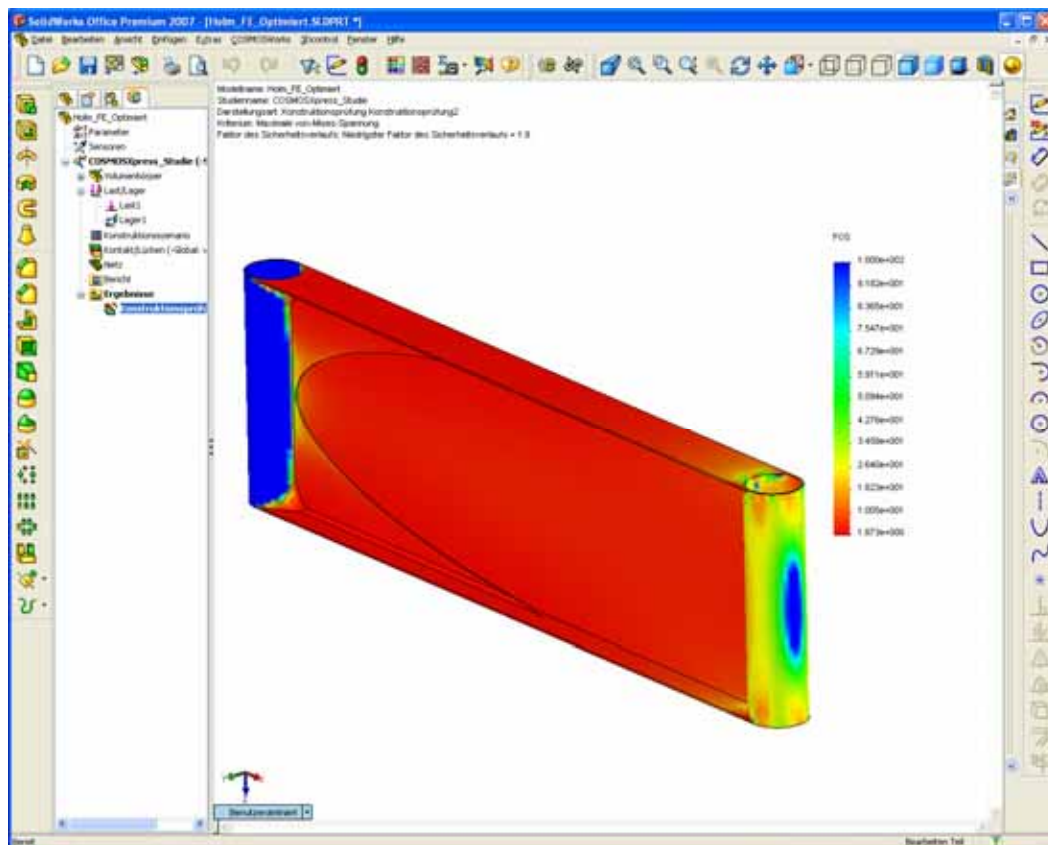


Abbildung 3-16: Ausgabe einer FE-Analyse von COSMOSWorks in SolidWorks

Die **Abbildung 3-17** zeigt die Integration von COSMOSWorks in SolidWorks durch die Ausgabe einer FE-Analyse in SolidWorks.

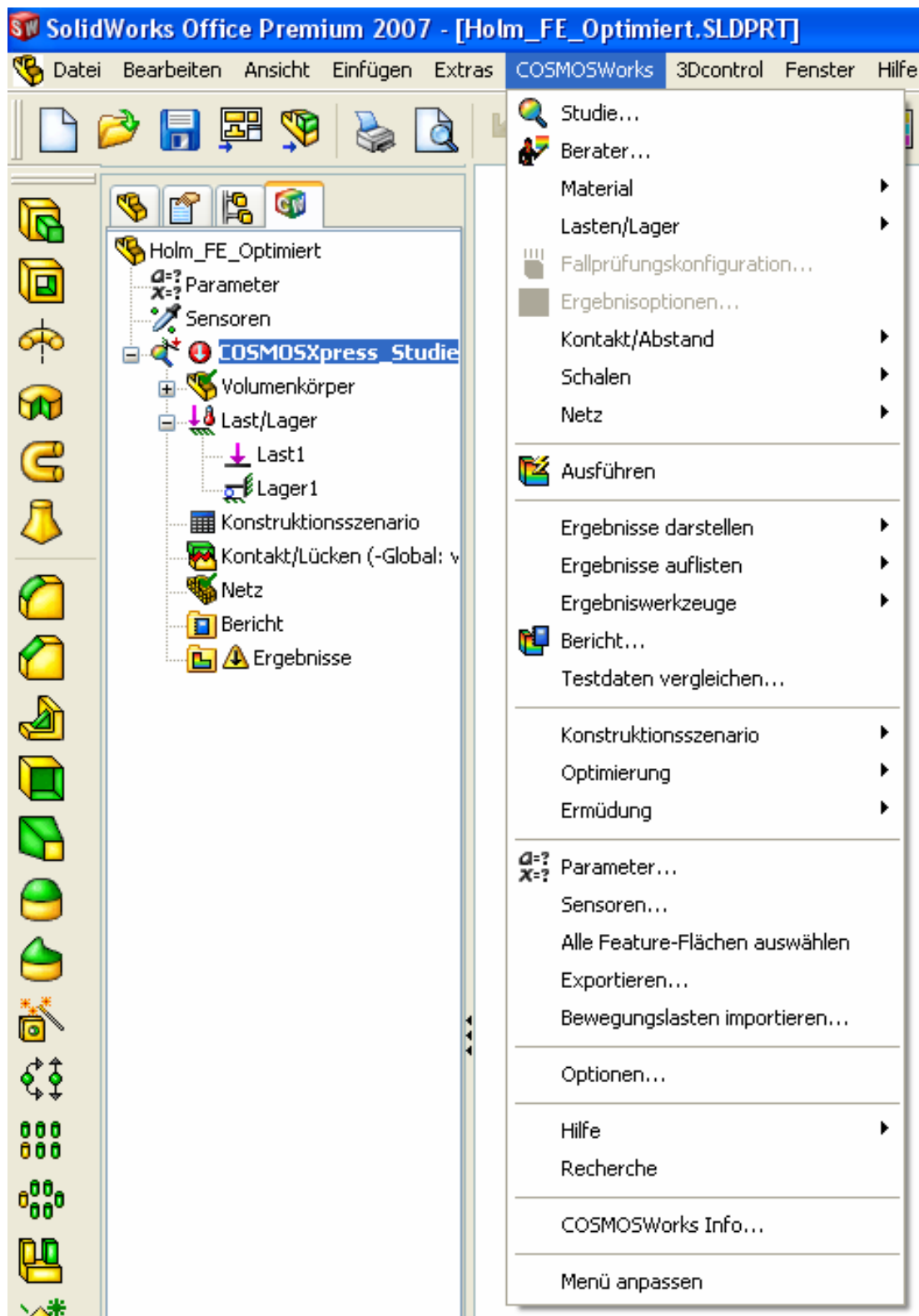


Abbildung 3-17: COSMOSWorks in SolidWorks integriert

In der **Abbildung 3-17** werden die vielfältigen Möglichkeiten von COSMOSWorks dargestellt. Die **Abbildung 3-18** gibt die Ausgabe von STL-Daten gemäß der Abbildung 3-1 wieder. Die **Abbildung 3-19** zeigt die Benutzeroberfläche des PDM-Systems SmarTeam.

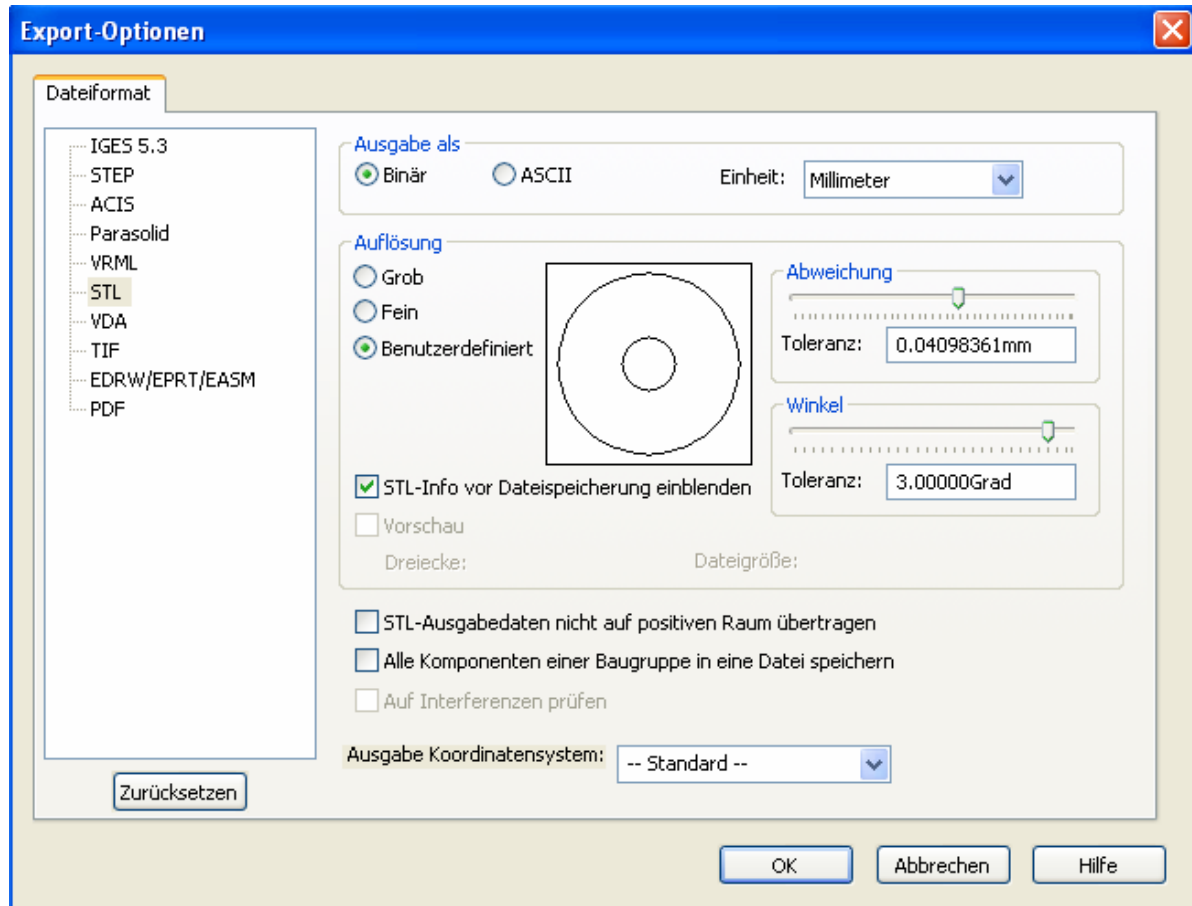


Abbildung 3-18: STL-Datenausgabe aus SolidWorks



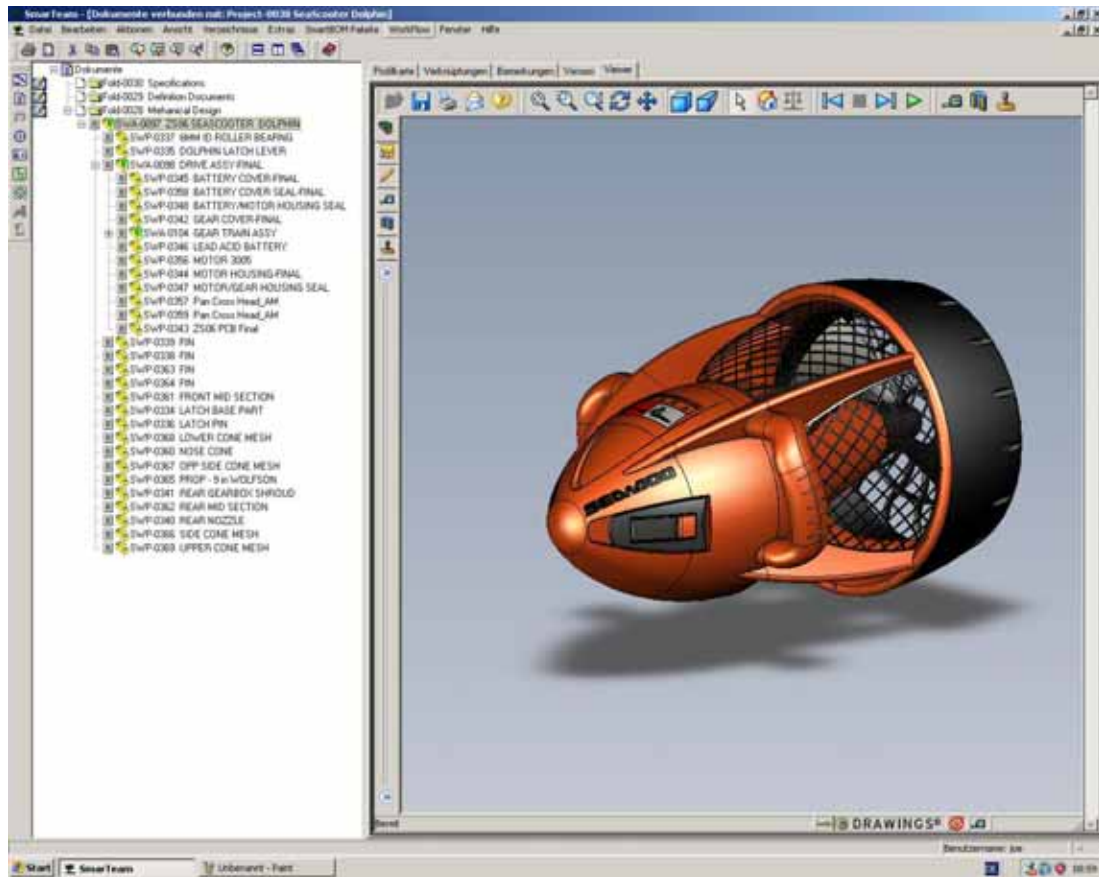


Abbildung 3-19: Benutzeroberfläche von SmarTeam

## 4 Klappmechanismus für einen Katamaran

Um einen Produktentwicklungsprozess in einem Unternehmen in Gang zu setzen, muss zunächst ein Produkt gefunden werden, welches einen wirtschaftlichen Erfolg verspricht. Für das hier umzusetzende Konzept steht nicht der wirtschaftliche Erfolg im Vordergrund der Produktfindung, sondern vielmehr muss im Rahmen der Produktidee (vgl. **Abbildung 4-1** und Abbildung 3-4) ein Produkt ausgewählt werden, welches für einen Nachweis der Machbarkeit einer ablaufgeregelten Produktentwicklung zumindest den folgenden Kriterien genügt:

- Baugruppe, bestehend aus mehreren Komponenten,
- Komplexe Konstruktion, deshalb ist der Einsatz eines 3D-CAD-Systems erforderlich,
- einzelne Komponenten stellen hoch belastete Strukturen dar,
- eine Überprüfung der Kinematik ist ebenso notwendig wie
- erhöhte Anforderungen an das Design.

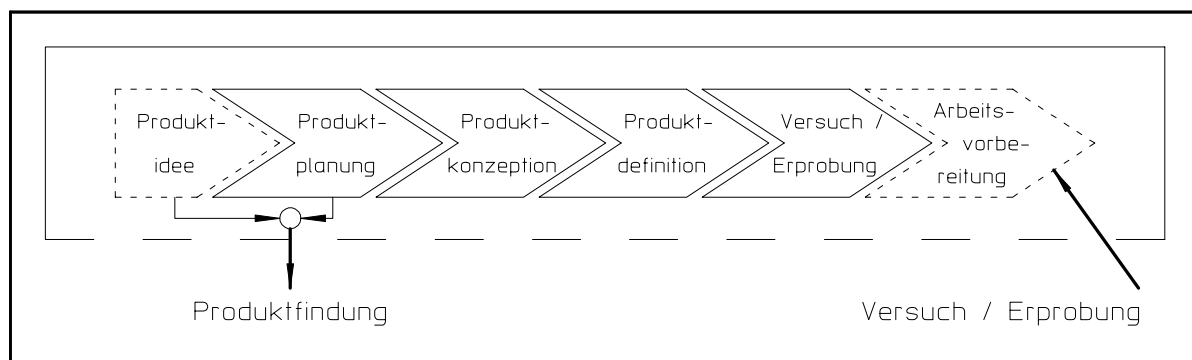


Abbildung 4-1: Produktfindung

Die Entwicklung eines Segelbootes beinhaltet diese geforderte Komplexität und stellt auch sehr hohe Ansprüche an die Konstruktion und das Design, so dass eine Entwicklung heute ohne den Einsatz der Informationstechnologie in einer vertretbaren Zeit kaum noch zu bewältigen ist. Dieses gilt umso mehr, wenn hier nicht nur ein einfaches Segelboot entwickelt werden soll, sondern ein Katamaran, ein so genanntes Mehrumpfboot, welches einerseits regattatauglich und andererseits wegen seiner enormen Breite auch noch zusammenklappbar sein soll, damit es in dem normalen Straßenverkehr transportiert werden kann, das heißt, das Segelboot ist somit trailerbar.

Die Anforderungen an eine durchgängige Produktentwicklung für einen trailerbaren Katamaran sind in jeder Hinsicht komplex genug, so dass eine derartige Aufgabenstellung einer beispielhaften Umsetzung des entwickelten Konzeptes gerecht wird. Unter dem Begriff „Durchgängigkeit“ wird die iterative Generierung eines Produktmodells verstanden, welches von allen Prozessen der Produktentwicklung genutzt wird und an dem jederzeit ohne eine neue Generierung des Produktmodells Änderungen für eine weitere Bearbeitung vorgenommen werden können.

Um den Umsetzungsaufwand in vertretbaren Grenzen zu halten, sei zunächst erklärt, dass im Rahmen dieser Arbeit kein komplett neues Boot (Schiff<sup>10</sup>) konstruiert bzw. entwickelt werden soll. Eine derartige Aufgabe ist sehr anspruchsvoll und von einer einzelnen Person nicht realisierbar und darüber hinaus bedarf es für die Lösung einer so komplexen Aufgabenstellung seitens des Konstrukteurs einer jahrelangen Erfahrung, um auch die nicht berechenbaren Randbedingungen bei einem Bootsbau zu lösen. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt im Bereich der festigkeitsgerechten Konstruktion einzelner Komponenten, die den Transport eines Katamarans erleichtern sollen. Da für die Entwicklung dieses Produktes die weiter oben genannten Kriterien zu lösen sind, soll im Rahmen der beispielhaften Umsetzung des Konzeptes ein völlig neuer Klappmechanismus entwickelt werden.

Beim Segeln wird eine Art eigene Sprache verwendet, die sich historisch entwickelt und über Jahre hindurch auch bewährt hat. Diese einheitliche Sprache ist schon allein deshalb notwendig, damit eine Verständigung innerhalb einer Segelmannschaft jederzeit gewährleistet ist. Aus der Vielzahl der auf dem Markt verfügbaren Segellexika [21], die hunderte von Wörtern umfassen, sind in der **Abbildung 11-1** nur die Segel-Begriffe kurz erläutert, die in dieser Arbeit verwendet werden.

Für das Verständnis der Arbeit ist es sinnvoll, einige wichtige Begriffe aus der Segeltechnik zu erläutern. Die hier erläuterten Begriffe und Inhalte beziehen sich weniger auf die Aerodynamik, sondern eher auf die Bootstypen und den Windeinfluss, denn ohne Wind ist das Segeln nicht mehr ganz so interessant. Der wirtschaftliche Aspekt ist zweitrangig, da die Entwicklung eines kompletten Bootes und die anschließende Herstellung dieses konstruierten Bootes allein aus Zeitgründen im Rahmen einer Dissertation nicht möglich sind.

---

<sup>10</sup> Schiff oder Boot, in dieser Arbeit wird für diese beiden Begriffe keine Unterscheidung vorgenommen

#### 4.1 Segelboot-Typen

Die Hauptbestandteile eines Segelbootes (Rumpf, Mast, Baum, Segel, Fock, Wanten, Ruder) sind in der **Abbildung 4-2** dargestellt und die entsprechenden segeltechnischen Erläuterungen dieser Begriffe können der Abbildung 11-1 im Anhang entnommen werden.. Der Rumpf ist ein mögliches Unterscheidungsmerkmal zur Klassifizierung von Segelbooten. Neben dem „normalen“ Segelboot mit einem Rumpf gibt es auch so genannte Mehr-rumpfboote (Multihull), z.B. Boote mit 2 Rümpfen gemäß der Abbildung 4-2, deren Rümpfe als Schwimmer ausgebildet sind. Sie haben die Bezeichnung Katamaran. Die Segelboote mit 3 Rümpfen, die neben den beiden Schwimmern über einen weiteren Rumpf in der Mitte des Bootes verfügen, werden Trimarane genannt. Der Bootstyp des Trimaran ist für diese Arbeit ohne Bedeutung und soll deshalb auch nicht weiter betrachtet werden. Deshalb wird im weiteren Verlauf nur noch zwischen einem Katamaran und einem „einfachen“ Segelboot unterschieden.

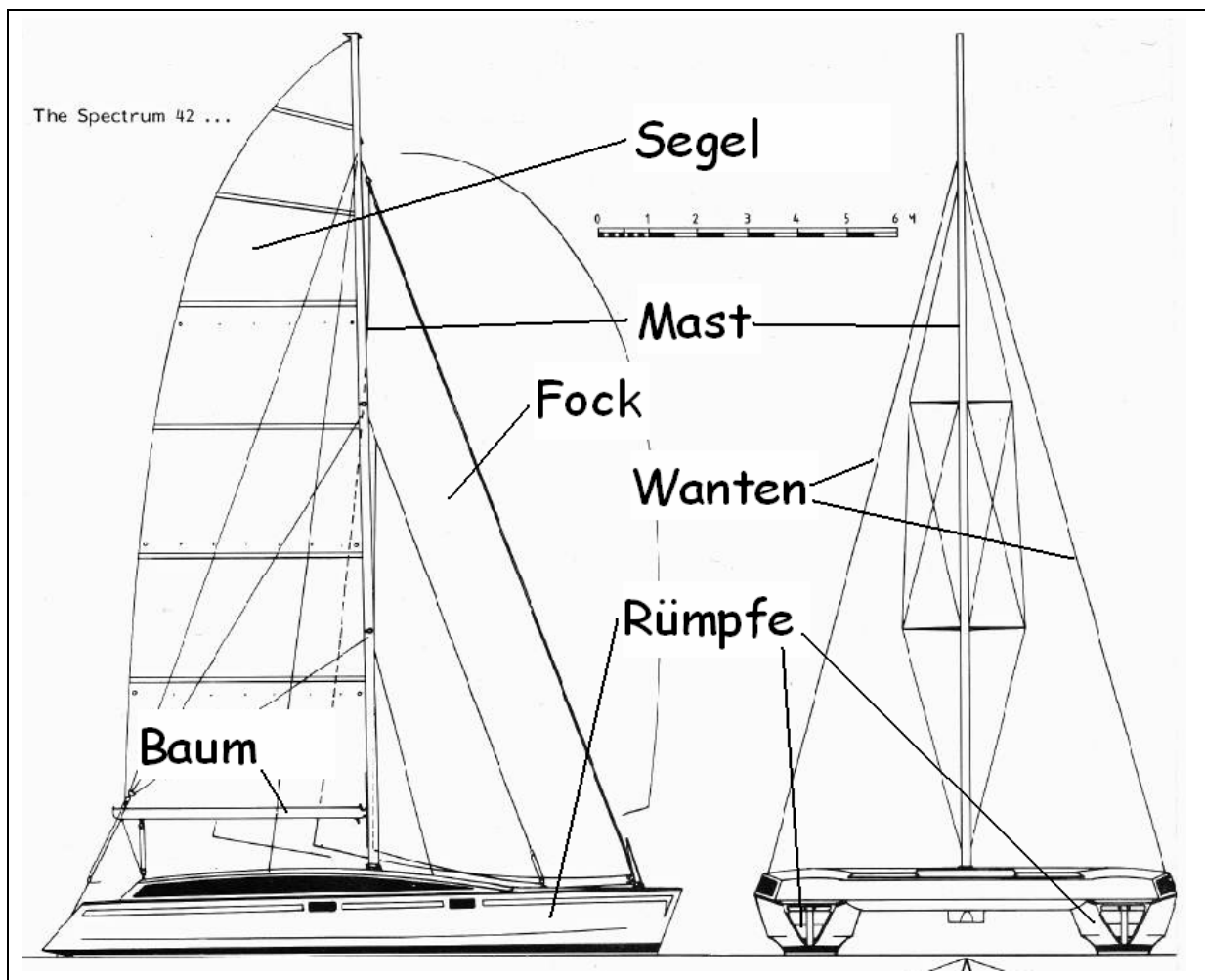


Abbildung 4-2: Katamaran Segelschiff [22]

Eine große Segelfläche ist beim Auftreten eines Windes quer zu diesem Segel einem sehr großen Druck ausgesetzt, so dass für die Stabilität eines Bootes als Gegenpol im Wasser ein Ballast mit entsprechendem Tiefgang vorgesehen werden muss. Ein großer Tiefgang verhindert allerdings, dass ein derartiges Boot in „normalen“ Gewässern nicht eingesetzt werden kann und somit das Segeln auf den Bereich der „tiefen“ Meere beschränkt bleibt. Bei einem Katamaran ist ein Ballast nicht unbedingt notwendig, da ein Umkippen des Bootes allein durch die Bauart und den Abstand der beiden Schwimmer kaum vorkommt. Damit ist auch das Segeln in „flachen“ Gewässern kein Problem (vgl. **Abbildung 4-3**)



Abbildung 4-3: Vergleich traditioneller und moderner Katamaran

Mit einem Katamaran können erheblich höhere Geschwindigkeiten erreicht werden, als mit einem herkömmlichen Einrumpfboot. Dies liegt allein schon an dem geringeren Länge / Breite-Verhältnis des Mehrumpfbootes. Aber auch das Fehlen eines Kieles und damit der Wegfall des Ballast-Gewichtes lässt eine Leichtbauweise zu, die sich letztendlich in einen Geschwindigkeitsvorteil umsetzen lässt. Ein Katamaran erscheint auf den ersten Blick unsinkbar, ist aber durchaus einer erhöhten „Kenter“-Gefahr ausgesetzt. So bieten die aus dem Wasser aufragenden höheren Aufbauten eines Katamarans eine sehr viel größere Angriffsfläche für den Wind als bei Einrumpfbooten.

Der Gesamteindruck der Abmessungen des Katamarans in der Abbildung 4-3 zeigt auf den ersten Blick, dass die einzelnen Abmessungen sehr genau aufeinander abgestimmt sein müssen, damit das Boot auch bei „rauer See“ allen Ansprüchen hinsichtlich der Stabilität des Bootes und des „Nichtkenterns“ genügt. Diese Abstimmung stellt an die Konstruktion eines Bootes erhöhte Anforderungen, wie der Vergleich mit einem bereits hergestellten Einrumpf-Segelboot [23] gemäß der **Abbildung 11-2** beispielhaft zeigt. Für dieses Boot wird bei einer Gesamtlänge von 26 m und einer Segelfläche am Wind von 320 m<sup>2</sup> ein Kielballast von ca. 19 t bei einem Tiefgang von 4,10 m benötigt. Der Katamaran in der Abbildung 4-3 hat ohne Kielballast nur 0,5 m Tiefgang und ein sehr viel geringeres Verhältnis von der Länge zur

Gesamtbreite des Bootes. Diese sehr unterschiedlichen Gegebenheiten wirken sich natürlich in großem Maß auf die Segeltechnik dieser beiden Boote aus. Manche der auftretenden Nachteile lassen sich durch entsprechende konstruktive Maßnahmen auf ein Minimum reduzieren; andere hingegen sind, bedingt durch den jeweiligen Bootstyp, nicht veränderbar.

## 4.2 Segeltechnik

Das wichtigste beim Segeln ist der Wind. Viele Laien sind der Ansicht, es kann nur mit achterlichem Wind gesegelt werden, das heißt, segeln nur mit dem Wind von hinten. Das stimmt nicht, sonst könnten alle nur immer in eine Richtung segeln und wären somit immer der Windrichtung komplett ausgeliefert. Das Gegenteil ist der Fall, denn es kann in fast alle Richtungen gesegelt werden, außer direkt gegen den Wind („*im Wind*“, vgl. **Abbildung 4-4**).

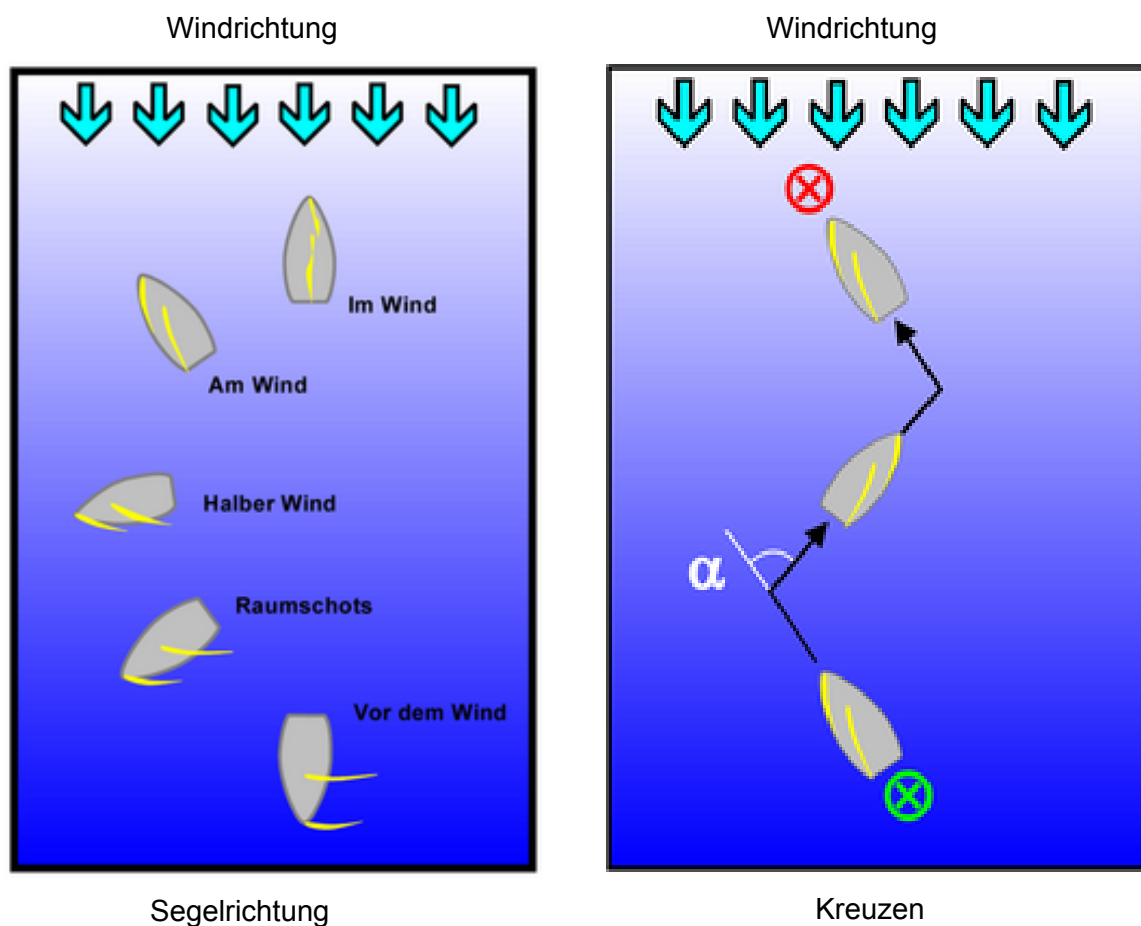


Abbildung 4-4: Segelrichtung zur Windrichtung und Kreuzen gegen den Wind [2]

Für die einzelnen Segel-Kurse gibt es in Beziehung zu dem Wind Bezeichnungen wie z.B. „*am Wind*“, „*halber Wind*“, „*Raumschots*“ oder „*vor dem Wind*“. Wenn ein Ziel erreicht werden

soll, zu welchem genau gegen den Wind gesegelt werden müsste, so kann dies mit einem „*Kreuzen hart am Wind*“ vorgenommen werden. Anders ausgedrückt heißt dies, das Ziel wird je nach Segelboottyp mit ca. 20 bis 30 Grad zur Windrichtung erreicht (vgl. Abbildung 4-4, rechte Darstellung). Der Begriff „*Kreuzen*“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass hier durch mehrfaches Wenden auf nicht direktem Weg zum Ziel gesegelt wird, sondern mit Hilfe eines so genannten „*Zickzack*“-Kurses.

Die jeweilige Segelart ist natürlich auch entscheidend von der jeweiligen Windstärke abhängig, denn ohne Wind gibt es keinen Antrieb, keinen Vortrieb und auch keine Manövrierfähigkeit. Dagegen kann zuviel Wind wiederum für Mensch und Material sehr gefährlich sein. Daher ist es äußerst wichtig, die aktuellen Windstärken zu kennen und darüber hinaus auch zu wissen, was bei welcher Windstärke zu tun ist, damit das Boot und die Besatzung gefahrlos an dem gewünschten Ziel ankommen.

Zur Definition der Windgeschwindigkeiten wird beim Segeln eine Beaufortscala verwendet. Die Windgeschwindigkeiten und deren Bedeutung sind in einer Tabelle in der **Abbildung 11-3** wiedergegeben. Je nach dem Typ des Segelbootes muss die Besatzung bei 4 - 6 Beaufort anfangen das Segel zu „*reffen*“ oder kleinere Segel zu verwenden. Reffen bedeutet eine Verkleinerung der Segelfläche, indem die Besatzung nur ein Teil des Segels nutzt (setzt) und gleichzeitig den Rest „*zusammen refft*“. Dadurch wird dem Wind eine wesentlich geringere Angriffs-Fläche geboten.

Selbst wenn der Wind von der Seite oder sogar schräg von vorne auf ein Boot trifft, das Boot kann trotzdem nach vorne segeln (vgl. Abbildung 4-4). Damit dies gelingt, wird der seitlich angreifende Wind mit Hilfe eines Segels in einen Vortrieb umgewandelt. Ähnlich wie bei der Tragfläche eines Flugzeuges entsteht hinter der Wölbung des Segels auf der Leeseite ein Unterdruck, der einen aerodynamischen Auftrieb erzeugt (vgl. **Abbildung 4-5**).

Dieser Auftrieb lässt sich in zwei Kräfte in X-Richtung und in Y-Richtung zerlegen. Die Kraft in X-Richtung sorgt für den „*gewünschten*“ Vortrieb und die Kraft in Y-Richtung verursacht als Querkraft den nicht gewollten Nebeneffekt, dass das Boot seitlich abdriftet, das heißt laienhaft ausgedrückt, „*das Boot bleibt nicht ganz in der Spur*“. Um diesem seitlichen Abdriften entgegenzuwirken, ist bei Segelbooten, insbesondere bei Einrumpfbooten, ein Schwert oder ein Kiel erforderlich, der ähnlich dem Seitenleitwerk eines Flugzeuges oder der Rückenflosse eines Fisches dafür sorgt, dass ein Schiff nach vorne und nicht zur Seite fährt. Da die durch ein Schwert oder einen Kiel ausgelöste Querkraft das Abdriften verhindert bzw. einschränkt, neigt sich ein Segelschiff mit zunehmender Windkraft zur Seite, fachlich

ausgedrückt, es „*krängt*“. Bei einem Mehrumpfboot (Katamaran) wirkt sich diese für das Segeln negative Eigenschaft nur unwesentlich aus und deshalb wird hier fast die gesamte Kraft in den Vortrieb umgesetzt.

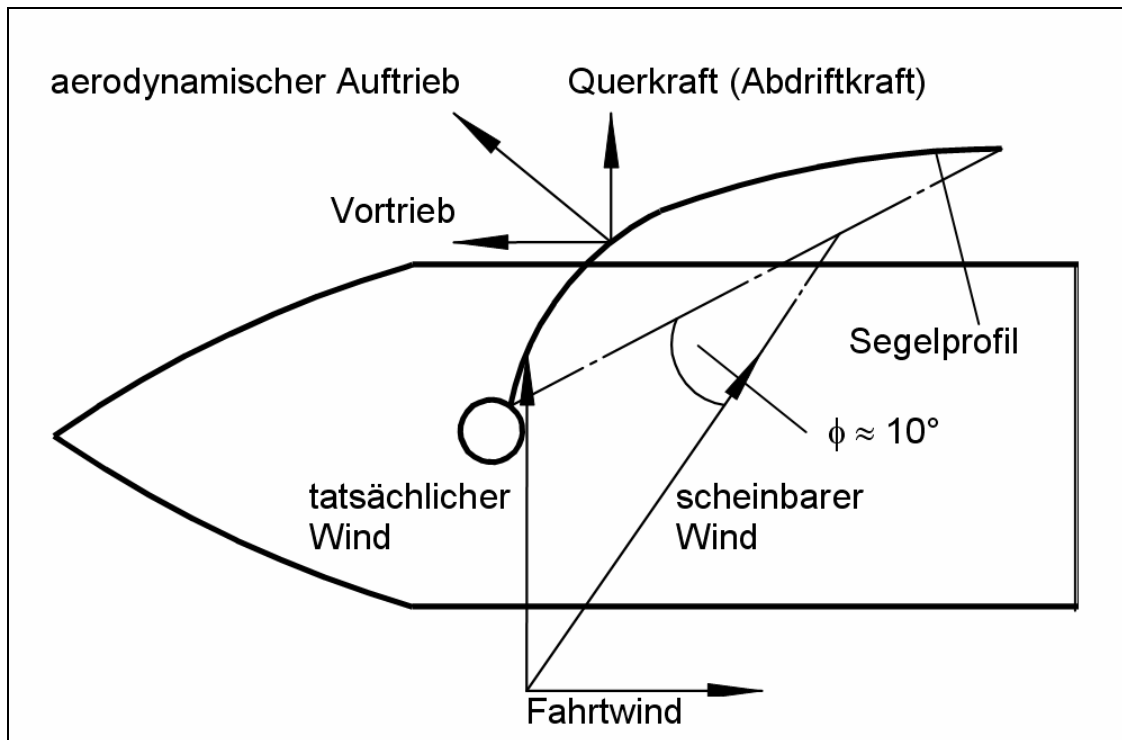


Abbildung 4-5: Kraftverhältnisse am Segel [24]

### 4.3 Segeleigenschaften und Aufbau eines Katamaran

Wenn z.B. ein Kielboot, durch Wind und Wellen bedingt, zu „*Krängen*“ beginnt, wird dies für eine Crew frühzeitig durch einen Wassereintritt in das Boot sichtbar und die Crew kann durch eine entsprechende Änderung der Segel darauf reagieren und somit das Boot vor einem „*Kentern*“ bewahren. (vgl. [22]). Wegen dieses fehlenden „*Wasserhinweises*“ kann bei einem Katamaran eine derartige Maßnahme zu spät eingeleitet werden und als Folge kentert das Boot vielleicht. Hier bedarf es sehr viel Erfahrung seitens der Besatzung, um zu verhindern, dass bei unberechenbarer See das Boot leicht „*krängt*“ (maximal 8 – 15 Grad möglich) und einer der beiden Schwimmer leicht abhebt. Wenn dies trotzdem geschieht, besteht die Gefahr, dass eine Windbö unter diesen Schwimmer einfällt und das Boot in einer Art Rückenlage zum „*Kentern*“ bringt und das Mehrumpfboot kann sich aus eigener Kraft nicht wieder aufrichten. Dieses sehr einfache Beispiel zeigt die Grenze der Seefähigkeit von



Katamaranen auf. Dieser Nachteil kann allerdings jederzeit durch ein rechtzeitiges „Reffen“ der Segel ausgeglichen werden. Bei so genannten Charterbooten wird diese Gefahr von vorneherein dadurch erheblich minimiert, in dem dieses Unfallrisiko durch eine Untertakelung der Boote fast ausgeschlossen wird.

Obwohl an die konstruktive Gestaltung eines Katamarans hohe Anforderungen gestellt werden, so sind die Vorteile eines Katamarans gegenüber einem Einrumpfboot nicht zu übersehen. Neben den sehr guten Segeleigenschaften bietet ein Katamaran bei gleicher Bootslänge durch seine größere Breite ein ruhiges Segeln und mehr Platz für einen Innenausbau an, da auch der Platz in den Schwimmern mit berücksichtigt werden kann. So gestattet die große Boots-Fläche ein aufrechtes Segeln und das gleichzeitige Unterbringen von sehr vielen Zusatzeinrichtungen, welche der Segel-Besatzung einen erheblichen Komfort bieten. Den prinzipiellen Aufbau und eine mögliche Raumaufteilung eines Katamarans zeigt die Darstellung in der **Abbildung 4-6**.

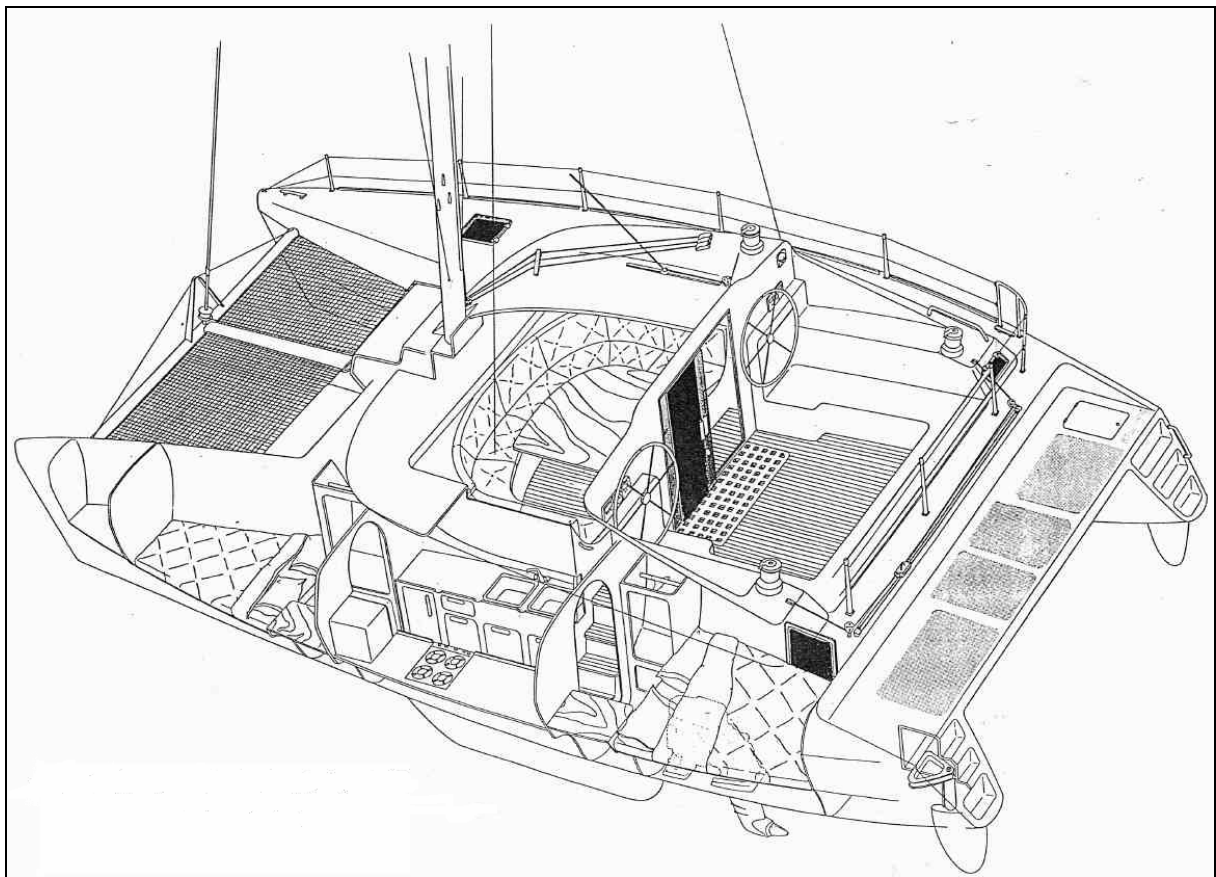


Abbildung 4-6: Aufbau und Ausbau eines Katamarans [22]

Natürlich ist der tatsächlich nutzbare Raum auch von der Größe eines Bootes abhängig. So bietet z.B. ein Einrumpf-Boot mit einer Länge von ca. 8m mehr Innenraum als gleichlange Katamarane oder sogar Trimarane. Unter Einbeziehung der vorhandenen nutzbaren

Außenfläche stehen die Mehrumpfboote allerdings besser da. Der Vorteil eines Katamarans bezüglich eines großen Innenraums wird aber erst mit dem Vorhandensein eines Deckhauses besonders deutlich. Dieser Komfort beginnt erst bei Booten ab ca. 10m Länge.

Hinsichtlich der Segeleigenschaften ist die Frage zu klären, ob und warum ein Mehrumpfboot besser als ein Einumpfboot ist. Obwohl Einumpfboote hinsichtlich der Geschwindigkeit in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht haben, so erreichen diese im Bereich der Regattaboote trotzdem noch immer nicht die Möglichkeiten der Mehrumpfboote und dies selbst bei schwierigen Wetterbedingungen. In der Öffentlichkeit werden die Katamarane in drei Kategorien eingeteilt:

- Standardkatamarane, die erheblich zum Segelspaß beitragen,
- Rennboote, die wegen ihrer Geschwindigkeit über alle Maßen beachtet werden und
- Fahrten-Katamarane, die sehr komfortabel zu segeln sind und viel Platz bieten für einen erholsamen Freizeitspaß.

Im Rahmen dieser Arbeit geht es um die Produktentwicklung hoch belasteter Strukturen, deshalb soll auf die Möglichkeiten eines Innenausbaus weniger Gewicht gelegt werden, sondern vielmehr Wert auf die Belastungen bei Regattaboote gelegt werden. In [24] wird in diesem Zusammenhang sehr anschaulich auf das „Magische Dreieck der Bootseigenschaften“ hingewiesen:

- Eine höhere Geschwindigkeit verlangt nach geringer Verdrängung.
- Mehr Komfort führt zu einer höheren Verdrängung und erfordert mehr Raum.
- Eine größere Verdrängung verringert bei gleicher Bootslänge die Geschwindigkeit.

Dies zeigt, dass bei einer Bootsentwicklung immer Kompromisse gemacht werden müssen, da sich nicht alle Anforderungen an ein Boot maximieren lassen. In dieser Arbeit steht die dritte Kategorie im Vordergrund, so dass insbesondere die Geschwindigkeit keinen sehr großen Stellenwert erhält. Dies wiederum erleichtert die Entwicklung etwas, da die Ermittlung der äußeren Belastung nicht alle widrigen Umstände erfassen kann, was gerade von einem Bootsbauer ein erhebliches Maß an Erfahrung erfordert.

Die Breite eines Katamarans bietet einerseits angenehme Segeleigenschaften, aber andererseits ist der Nachteil einer erhöhten Festigkeitsbeanspruchung der Konstruktion nicht zu übersehen. Bei der Konstruktion ist zu beachten, dass diese Boote wegen ihrer flachen Bauweise zwar einem geringen Wasserwiderstand, dafür aber einen erhöhtem Wind-

widerstand ausgesetzt sind. Hier reicht es nicht aus, das Boot unnötig schwer zu bauen, denn dies setzt sowohl die Geschwindigkeit als auch den Auftrieb herab. Letzteres erhöht wiederum die Kentergefahr zusätzlich. Die Breite stellt insbesondere für den Transport außerhalb des Wassers einen erheblichen Nachteil dar. Dieses Problem soll mit Hilfe einer ablaufgeregelten Produktentwicklung gelöst werden.

#### **4.4 Produkt-Findung**

Die Ausführungen haben gezeigt, dass jeder Bootstyp (Ein- oder Mehrumpfboot) gewisse Vor- und Nachteile aufweist. Damit die Vorteile eines Einrumpf-Bootes bezüglich seiner Transportfähigkeit mit den Vorteilen eines Katamarans hinsichtlich der Segeleigenschaften miteinander kombiniert werden können, soll nun im Rahmen einer Produktentwicklung ein Klapp-Mechanismus konzipiert werden, der es gestattet, die beiden Schwimmkörper eines Katamarans auseinander zu fahren (offene Stellung zum Segeln) oder zusammen zu fahren (geschlossene Stellung für den Transport). So liegen einerseits in dem offenen Zustand alle Vorteile eines Katamarans für das Segeln vor und andererseits bedeutet der geschlossene Zustand, dass trotz der kompakten Maße eines normalen Bootes kein schwerer Kiel mehr vorliegt und dieser „Gegenstand“ optimal für einen Transport auf einem Anhänger geeignet ist.

Die Aufgabenstellung für einen Klapp-Mechanismus erfüllt die erhöhten Anforderungen, die zum Nachweis des Konzeptes einer ablaufgeregelten Produktentwicklung erforderlich sind. Die Komponenten des Klapp-Mechanismus werden beim Segeln (offene Stellung) durch Wind und Wellen hoch belastet und deshalb muss deren Festigkeit unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors mittels einer FE-Analyse nachgewiesen werden. Für den Transport (geschlossene Stellung) werden erhöhte Anforderungen an die Kinematik gestellt, die ohne die Herstellung eines Prototyps nicht mit der nötigen Sicherheit gewährleistet werden kann. Der Klapp-Mechanismus ist aber nur ein Teil eines Katamarans, der deshalb nicht losgelöst von dem gesamten Boot konzipiert werden kann. Obwohl die Entwicklung des gesamten Bootes nicht im Vordergrund steht, so ist doch für das Boot ein entsprechendes Design zu entwickeln, um eine spätere Vermarktung nicht außer acht zu lassen.

Vor der Umsetzung einer Produktidee (vgl. Abbildung 1-1 und Abbildung 4-1) in eine konstruktive Lösung muss zunächst die Produktidee dahingehend überprüft werden, ob diese Idee wirklich neu ist. Diese Überprüfung ist schon deshalb notwendig, da für bereits existierende gleichartige Produkte der Entwicklungsaufwand in keinem Verhältnis zu dem zu

erwartenden Gewinn im Falle einer Vermarktung steht. Ein weiterer Grund für eine intensive Recherche könnte sein, dass das entwickelte Ergebnis so neuartig und einzigartig ist, dass eventuell der Versuch unternommen werden kann, dieses neue Produkt (diese Idee) gemäß der **Abbildung 11-4** als Patent anzumelden. In beiden Fällen muss eine umfangreiche Recherche aufzeigen, ob die hier umzusetzende Idee schon bekannt ist, und ob sich diese Idee von den bereits vorhandenen Konzepten in wesentlichen Merkmalen unterscheidet.

Für derartige Recherchen eignet sich heute insbesondere das Internet mit seinen vielfältigen Suchmaschinen. Neben dem Internet kommen aber auch alle anderen Medien wie Zeitschriften und Fachbücher in Frage. Des Weiteren werden auch Gespräche mit kompetenten, erfahrenen Experten in die Recherche mit einbezogen, damit ausgeschlossen werden kann, dass genau dieses oder ein ähnliches Produkt bereits existiert. Mit Hilfe des Internets hat der Verfasser eine deutsche, europäische und weltweite Patent- und Gebrauchsmusterrecherche an der Universität in Dortmund durchgeführt. Die Recherche führte zu dem folgenden Ergebnis:

- In der Patentschrift **DE 3228579 C2** wird ein Mechanismus zum Einschieben der Schwimmer verwendet, wobei diese insbesondere in einem eingefahrenen Zustand nur mit erheblicher Beeinträchtigung genutzt werden können. Die hier vorliegende Konstruktion ist so gestaltet, dass der nutzbare Raum sich erheblich verkleinert. Die Reduzierung geschieht in ähnlicher Art und Weise wie bei einem Kofferraum eines offenen KFZ-Cabrios.
- In der Patentschrift **EP 1021 331 B1** und in der Gebrauchsmusterschrift **DE 201 08 913 U1** wird angezeigt, dass ein "*Wohnen*" nur im Zentralmodul, also in dem Deckaufbau und nicht in den Schwimmern stattfindet.
- In der Patentschrift **EP 1021 331 B1** wird ein Mechanismus zum teleskopartigen Zusammenfahren der Schwimmer verwendet, der aber, nach der Meinung des Verfassers dieser Arbeit, in der dort aufgezeigten Bauform und Dimensionierung die bei hohem Seegang entstehenden Kräfte nicht aufnehmen kann. Diese Tatsache ist sicherlich auch ein Grund dafür, dass dieses Prinzip in der Praxis keine Verwendung findet.
- In der Patentschrift **DE 201 08 913 U1** sind die Schwimmerhalterungen außen an einer Gondel angebracht, wodurch die Schwimmer nicht komplett unter den Deckaufbau gefahren werden können. Des Weiteren sind bei diesem Konzept nicht die Schwimmer, sondern nur die mittlere Gondel bewohnbar.

Das Ergebnis dieser Recherche führt bezüglich der Produktidee „*Klappmechanismus für Katamarane*“ in der Zusammenfassung zu dem folgenden Ergebnis:

- Nach dem Stand der Technik sind momentan nur Konzepte bekannt, die bei Mehrrumpf-Booten das Anklappen oder demontieren der Schwimmer erfordern.
- Der jeweils verwendete Mechanismus ist abhängig von dem maximalen Gewicht und der Größe der Schwimmer.
- Die Schwimmer sind überwiegend nicht bewohnbar, d.h., nicht mit Schlafplätzen (Kojen), Küche (Kombüse), Bad, WC, Navigationsplatz etc. ausrüstbar, es sei denn, es wird ein erheblicher Raumverlust wegen der geforderten Klappbarkeit in Kauf genommen.

Die zusammenfassende Beurteilung des Ergebnisses der Recherche ist eindeutig und zeigt, dass die bisherigen Katamarankonzepte nicht den gewünschten Anforderungen der Benutzer entsprechen. Deshalb wird von dem Verfasser dieser Arbeit die folgende Produktidee im Rahmen eines durchgängigen Produktentwicklungsprozesses gemäß der Abbildung 3-4 in eine konstruktive Lösung umgesetzt:

*Entwicklung eines Klappmechanismus zum Anklappen von  
zwei bewohnbaren Schwimmern unter einen mittleren Deckaufbau,  
damit ein normaler Transport auf der Strasse realisiert werden kann.*

Die Lösung wird mit den ausgewählten Softwareprodukten gemäß Kapitel 3.8 unterstützt, wobei die einzelnen Detailprozesse Produktkonzeption, Produktdefinition und Versuch / Erprobung sukzessiv abgearbeitet werden. Die jeweils erzielten Teilergebnisse werden immer unmittelbar dargestellt und diskutiert.

## 5 Produktkonzeption für das Beispiel „trailerbarer Katamaran“

In dem Detailprozess Produktkonzeption (vgl. **Abbildung 5-1** und Abbildung 3-4) werden zunächst die tatsächlichen Anforderungen an das Produkt „*Klappmechanismus*“ formuliert. Anschließend werden einige alternative Grundprinzipien für einen neuen Mechanismen erarbeitet und deren Machbarkeit im Hinblick auf die Erfüllung der Anforderungen überprüft.

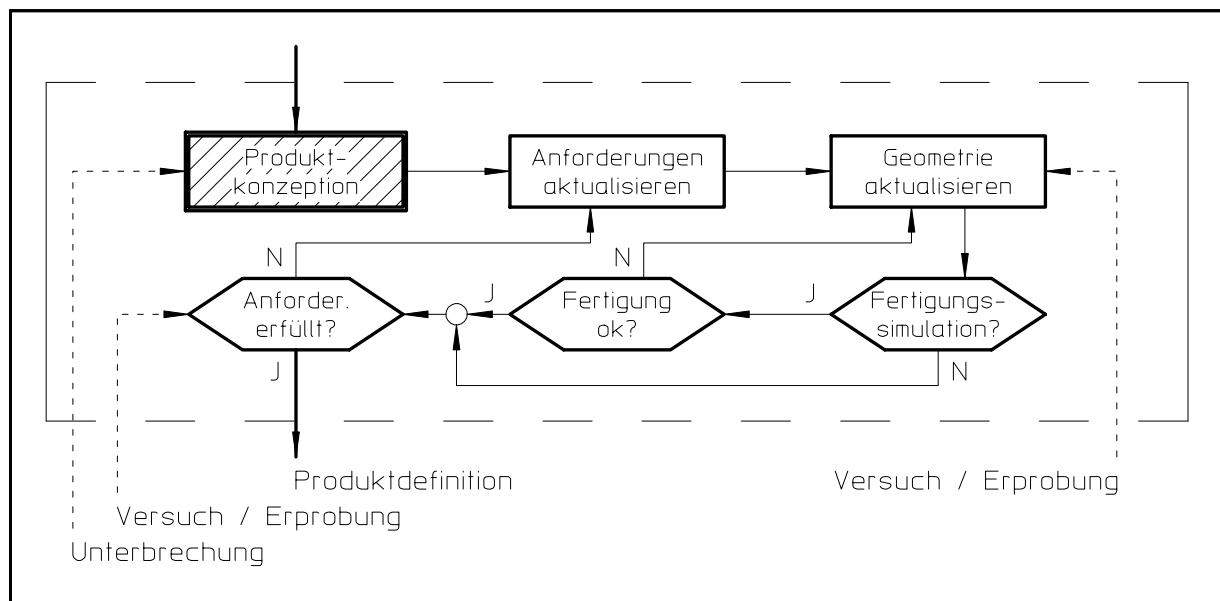


Abbildung 5-1: Phase „Produktkonzeption“

Die Lösungen für die Grundprinzipien werden jeweils auch mit dem 3D-CAD-System erarbeitet, aber für deren Darstellung wird hier zunächst nur eine einfache Form gewählt. Erst wenn eine „*erste gültige*“ Lösung gefunden ist, wird diese als exakte dreidimensionale Darstellung wiedergegeben und eine Zeichnung als Fertigungsunterlage, die mittels einer 2D-CAD-Ableitung aus dem vorhandenen 3D-Modell automatisch erzeugt wird. Vor dieser Ableitung kann mit Hilfe eines CAM-Systems die Fertigung des konzipierten 3D-Modells hinsichtlich seiner Herstellbarkeit simuliert werden.

Die vorläufig „*endgültige*“ Lösung stellt den Eingang in den nachfolgenden Detailprozess Produktdefinition (vgl. Abbildung 5-1) dar. Des Weiteren können dieser Abbildung die in einer Produktentwicklung üblichen Rückkopplungen entnommen werden. In dieser Phase des Produktentwicklungsprozesses sind dies die Rückkopplungen aus beiden nachfolgenden Detailprozessen Produktdefinition und Versuch / Erprobung.

### **5.1 Anforderungen an den Klappmechanismus**

Zur Formulierung der Anforderungen sind allgemein zu berücksichtigen: die vom Gesetzgeber vorgegebenen Werte müssen eingehalten werden, das Boot muss den Belastungszuständen bei Sturm und sehr hohem Wellengang standhalten, die Form des Unterwasserschiffes muss gemäß dem Stand der Technik hydrodynamisch gestaltet werden, das Boot muss mit einer Besatzung von 1-2 Personen segelbar sein und es sollte ein Platzbedarf für mindestens 4 Personen gegeben sein. Für diese allgemeine Beschreibung lassen sich nun die folgenden Hauptanforderungen an einen zusammenklappbaren Katamaran formulieren:

- Eigenschaften wie Geschwindigkeit, Komfort, Gewicht, Segeleigenschaften, Festigkeit, Antrieb, Design dürfen gegenüber einem nichtklappbaren Katamaran in nichts nachstehen.
- Um ein Umkippen beim Segeln zu minimieren, sollte der Abstand der beiden Schwimmkörper im Fahrbetrieb ca. 6 m betragen.
- Für den Transport auf normalem Wege über Straßen, also per Anhänger an einem KFZ ohne Sondergenehmigung, darf eine maximale Breite von 2,5 Metern und ein maximales Gewicht inklusive Anhänger von 3,5 Tonnen nicht überschritten werden.
- Da ein Anhänger (Trailer) dieser Größe selbst etwa 700 kg wiegt und bei einem Schiff mit diesen Abmessungen mindestens eine Masse von ca. 300 kg für die Ausrüstung ausgegangen werden muss, ist somit eine maximale Masse von 2.500 kg für das Schiff vorgegeben.
- Bei einer (zusammengeklappten) Gesamtbreite von 2,5 Metern darf die Außenbreite jedes Schwimmers maximal 1,25 m sein.
- Die Länge kann mit ca. 10 Metern angenommen werden, da ein wesentlich längeres Schiff zu schwer und unhandlich für den Transport ist. Bei einem kürzeren Schiff passt bei einer angestrebten Stehhöhe in den Rümpfen von zwei Metern das Verhältnis von Länge zu Höhe optisch nicht.
- Die Performance eines Bootes ist zwar abhängig von der Rumpfform und dem Gewicht, aber auch sehr wesentlich von der Länge.
- Trotz der Größe des Bootes sollte ein geringes Gesamtgewicht erreicht werden, um eine gute Performance und gute Segeleigenschaften zu gewährleisten.

Zum besseren Verständnis dieser Anforderungen an einen Klappmechanismus für einen Katamaran werden nachfolgend beispielhaft die Abmessungen und Daten (vgl. **Abbildung 5-2**) eines nicht klappbaren Katamarans wiedergegeben. Bei dem sportlich ausgelegten Katamaran handelt es sich um ein Mehrumpf-Boot vom Typ VIK 105 (vgl. **Abbildung 5-3**).

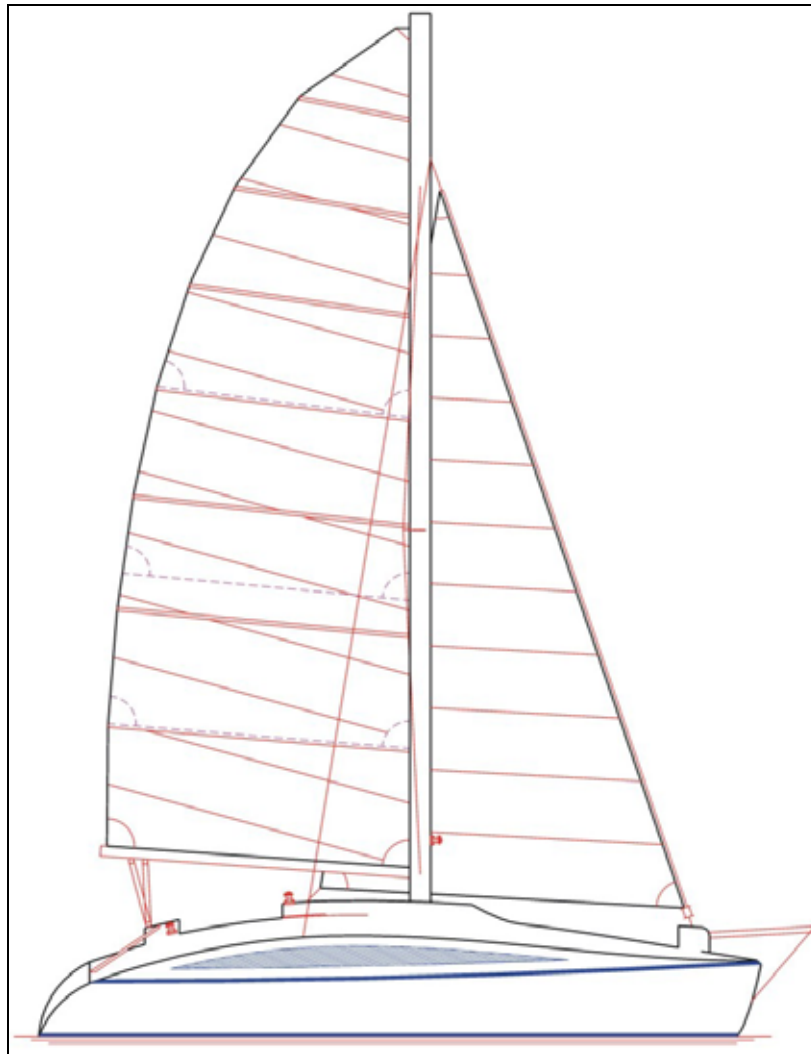


Abbildung 5-2: Seitenansicht Katamaran VIK 105 [26]

	Abmessung		Abmessung
Länge	10,15 m	Mast	12,90 m / 5 m <sup>2</sup>
Breite	6,31 m	Großsegel	41 m <sup>2</sup>
Wasserlinie	10,15 m	Focksegel	27 m <sup>2</sup>
Tiefgang	0,38 / 1,92 m	Spinnaker	106 m <sup>2</sup>
Leergewicht	1.900 kg	Stehhöhe	1,85 m
Gewicht mit vollen Tanks und Besatzung			2.900 kg

Abbildung 5-3: Abmessungen des Katamaran VIK 105

Hinsichtlich der räumlichen Gestaltung des Innenausbaus von Katamaranen gibt es eine ganze Reihe unterschiedlicher Konzepte. Grundsätzlich bieten die Mehrumpfboote mehr Möglichkeiten als die Einrumpfboote, was den verfügbaren Raum und dessen Ausstattung betrifft. In der Tatsache, dass mehr Einrichtungsgegenstände untergebracht werden können, liegt aber gleichzeitig auch die Gefahr, dass das Gewicht des Bootes insgesamt zunimmt und damit dem Kriterium des angestrebten Leichtbaus erheblich widerspricht. Da der



Innenausbau aber nicht die primäre Aufgabe diese Arbeit darstellt, werden die Möglichkeiten, die sich für eine Innenraumgestaltung ergeben, nur kurz aufgeführt. Hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung der beiden Schwimmer wird allerdings eine mögliche spätere Innenausstattung schon berücksichtigt.

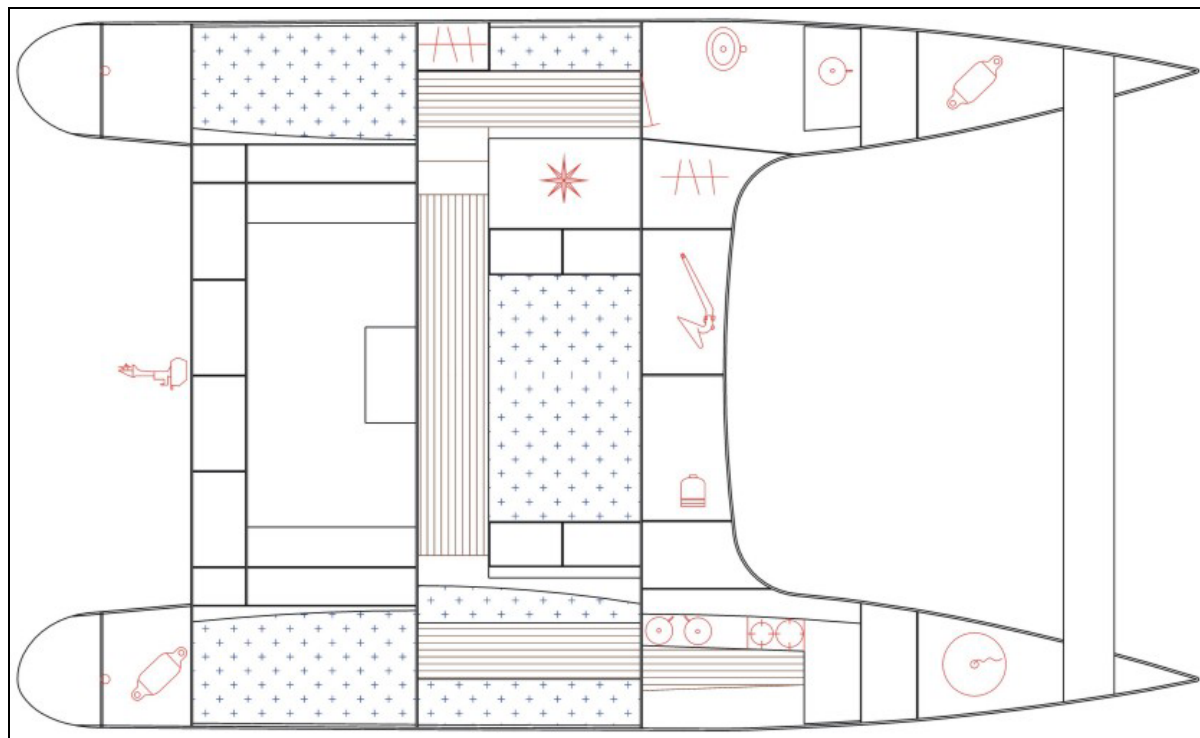


Abbildung 5-4: Einrichtungsplan VIK 105

Die **Abbildung 5-4** zeigt in einer vereinfachten Darstellung einen Einrichtungsplan für einen Katamaran. Dieser so genannte Mehrraum in Katamaranen ist insbesondere für Charterboote sehr interessant, die als Reise- und Fahrtenboote eingesetzt werden und sich somit sowohl für das sportliche Fahrtensegeln als auch für das komfortable Reisen hervorragend eignen. Ebenso können diese Boote auch als Spaßboote genutzt werden und dem Segler viel Erholung im Urlaub aber auch an Wochenenden bieten.

Für trailerbare Boote sind im Hinblick auf die Komfortausstattung sicherlich Grenzen gesetzt, zumal das Gewicht für derartige Boote einer Beschränkung unterliegen muss, da diese Boote auf der Strasse transportiert werden sollen, vorausgesetzt, der Katamaran ist auch zusammenklappbar. Wenn ein Boot nicht zusammenklappbar ist, so ist der Aufwand für den Transport eines Bootes erheblich höher und auf normalen Strassen zur Tageszeit sicherlich nicht durchführbar, wie die Darstellung in der **Abbildung 5-5** zeigt.



Abbildung 5-5: Photo von VIK 105 beim Transport

Bei der Konstruktion des Klappmechanismus muss unbedingt darauf geachtet werden, dass das Gewicht des gesamten Mechanismus einschließlich der dafür erforderlichen Mechanik aus den vorab genannten Gründen nicht zu groß wird. Deshalb muss dieses Gewichtsproblem durch eine möglichst intelligente Konstruktion in Verbindung mit einer optimalen Wahl der richtigen Werkstoffe kompensiert werden. Des Weiteren muss die hier zu entwickelnde Mechanik für den Klappmechanismus auch den außergewöhnlichen Beanspruchungen, wie z.B.

- bei einem Orkan,
- beim Trockenlaufen (auf dem Grund aufsetzen) oder
- bei kleineren Kollisionen (z.B. beim Manövrieren),

hinsichtlich ihrer Festigkeit jederzeit standhalten.

## **5.2 Vorbereitende Entwicklungsarbeiten für ein neues Konzept**

Eine neue Idee lässt sich nicht immer unmittelbar per Knopfdruck in eine komplette Konstruktion umsetzen. In der Regel bedarf es dazu vieler kleiner Schritte, die dann als Ganzes eine neue Lösung ergeben und zwar genauso, wie es das Konzept einer ablauf-

geregelten Produktentwicklung vorsieht. Deshalb wird hier ohne die Berücksichtigung der äußeren Belastung zunächst durch einzelne Entwicklungsstufen ein Grundprinzip für den Klappmechanismus erarbeitet, bis letztendlich ein in jeder Beziehung realisierbares, d.h., ein den Anforderungen entsprechendes tatsächlich umsetzbares Konzept vorliegt. Nach der Bestimmung des konstruktiven Grundprinzips können dann in dem nachfolgenden Detailprozess Produktdefinition die wesentlichen Komponenten unter Berücksichtigung der vorgegebenen Randbedingungen detailliert konstruiert werden.

Als Eingangsgrößen für die Entwicklung der Grundprinzipien sind definiert: Der Katamaran erhält als Mehrrumpfwasserfahrzeug 2 bewohnbare Schwimmer und einen weitestgehend offenen Deckbereich mit einem achterlichen, zentralen, mittigen Cockpit und ein Steuer bei einer variablen Breite. Jeder der beiden Schwimmer, die der Katamaran hat, wird mit 2 Querstreben versehen, die jeweils vorn und hinten sowohl unter dem mittleren Deckaufbau als auch an den Schwimmern drehbar in der vertikalen Achse gelagert sind. Die Schwimmer mit einer ausgeklappten Breite von über 6 Metern müssen mittels eines Mechanismus komplett unter den Deckaufbau bewegt werden, so dass die Gesamtbreite des Schiffs um mehr als die Hälfte reduziert werden kann und wodurch eine für den Transport vertretbare Breite von etwa 2.5 Metern erreicht wird.

In dem ausgefahrenen Zustand der beiden Schwimmer werden vergleichbare Segel-eigenschaften erreicht, wie mit einem herkömmlichen Katamaran dieser Baugröße. Durch den vergleichsweise flachen Deckaufbau ist an Deck, also oben, ein geringes Gewicht zu erwarten und der Schwerpunkt des Katamarans liegt durch die Anordnung der "*schweren Dinge*", wie die Einrichtung, die Tanks, die Batterien etc., in den Schwimmern recht tief. Dieses entspricht auch dem Grundprinzip bei dem Bau von fast allen Schiffen, da dies zur Verbesserung der Segeleigenschaften beiträgt.

Der Windwiderstand, der bei Schiffen dieser Bauart je nach Kurs zum Wind größer als der Wasserwiderstand sein kann, ist durch den sehr flachen Deckaufbau gering, was höhere Geschwindigkeiten bedeutet, vor allem bei Kursen "*am Wind*".

Die beiden Schwimmer können durch eine Luke im Heckbereich betreten werden. Die Raumaufteilung umfasst nach dem Abgang, Kombüse, Toilette und Doppelkojen. Die Luken müssen in jedem Fall wasserdicht verschließbar sein. Die Schwimmer sind im ausgefahrenen Zustand und durch das Nach-Hinten-Klappen der beiden Schwimmer auch im eingefahrenen Zustand durch die Luke zu begehen und ohne Einschränkungen voll nutzbar. Der unter Deck befindliche Wohn- und Schlafbereich ist daher auch ähnlich einem Wohn-

wagen nutzbar, wenn dieses Schiff auf einem Trailer hinter einem Fahrzeug transportiert wird oder zusammengefahren im Hafen liegt.

Nach der allgemeinen Beschreibung der notwendigen konstruktiven Konzepte können nunmehr anschließend die einzelnen aufeinander aufbauenden Entwicklungsstufen detailliert vorgestellt werden. Für die Erarbeitung der konstruktiven Prinzip-Lösung wird bereits das 3D-CAD-System SolidWorks eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass auch in der Prinzipphase ein reales 3D-Modell erstellt wird, welches später auch für die Detaillierung der exakten Lösung genutzt werden kann. Darüber hinaus kann dieses 3D-Modell auch zur Kollisionsuntersuchung für die Bewegungen des Klappmechanismus herangezogen werden.

### **1. Entwicklungsstufe:**

Die beiden Schwimmer des Katamarans werden mittels einzelner Streben unter dem Deckaufbau ineinander gefahren (vgl. **Abbildung 5-6**). Auf Grund der Länge der Streben können die beiden Schwimmer nicht ganz aneinander gefahren werden. Eine auf dem Deckaufbau befindliche Kajüte (vgl. **Abbildung 5-7**) schafft zwar zusätzlichen überdachten Raum, aber durch die recht hohe Gesamthöhe der Schwimmer und des Deckaufbaus wirkt der Katamaran einerseits sehr klobig und ermöglicht andererseits keine geeignete Stehhöhe in den Schwimmern und in der Kajüte.

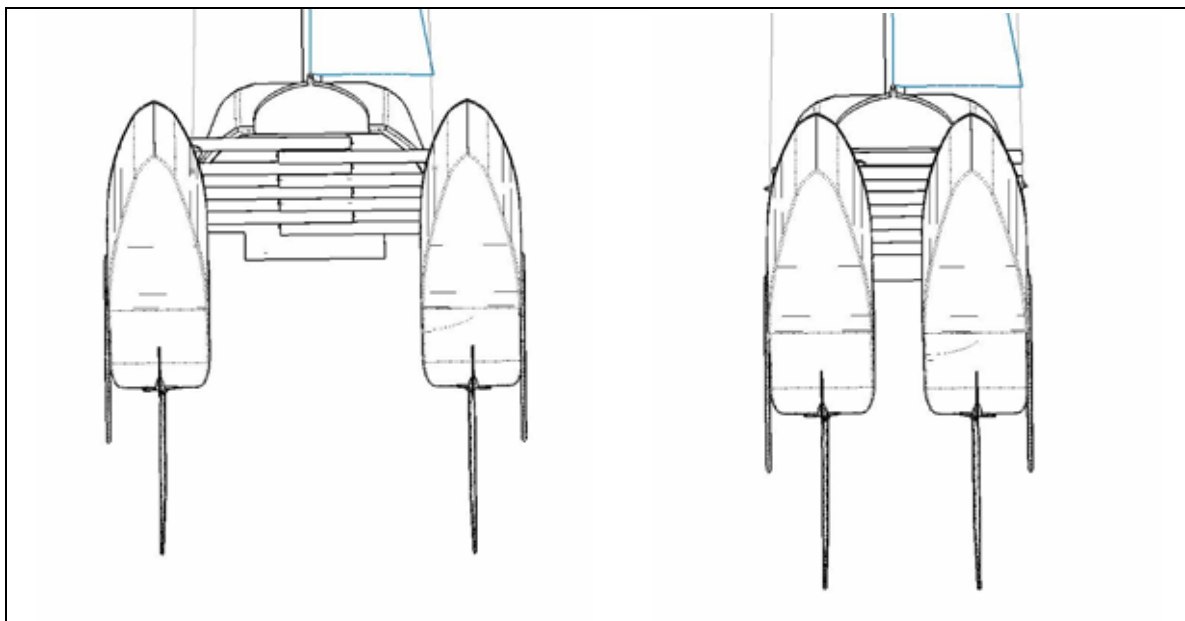


Abbildung 5-6: Bewegung der Schwimmer (1. Entwicklungsstufe, Sicht von unten)

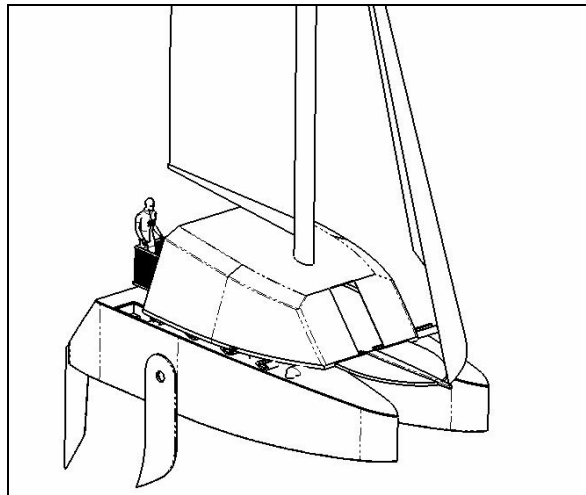


Abbildung 5-7: Deckaufbau (1. Entwicklungsstufe)

## 2. Entwicklungsstufe

Im Gegensatz zur 1. Entwicklungsstufe (vgl. Abbildung 5-6) werden nun die Schwimmer ganz aneinander gefahren (vgl. **Abbildung 5-8**). Dies wird dadurch erreicht, dass die Streben etwas verkürzt werden, allerdings muss dadurch der Deckaufbau entsprechend verstärkt werden, da sich die Verkürzung der Streben auf die Führungsmöglichkeiten im Deckaufbau negativ auswirkt.

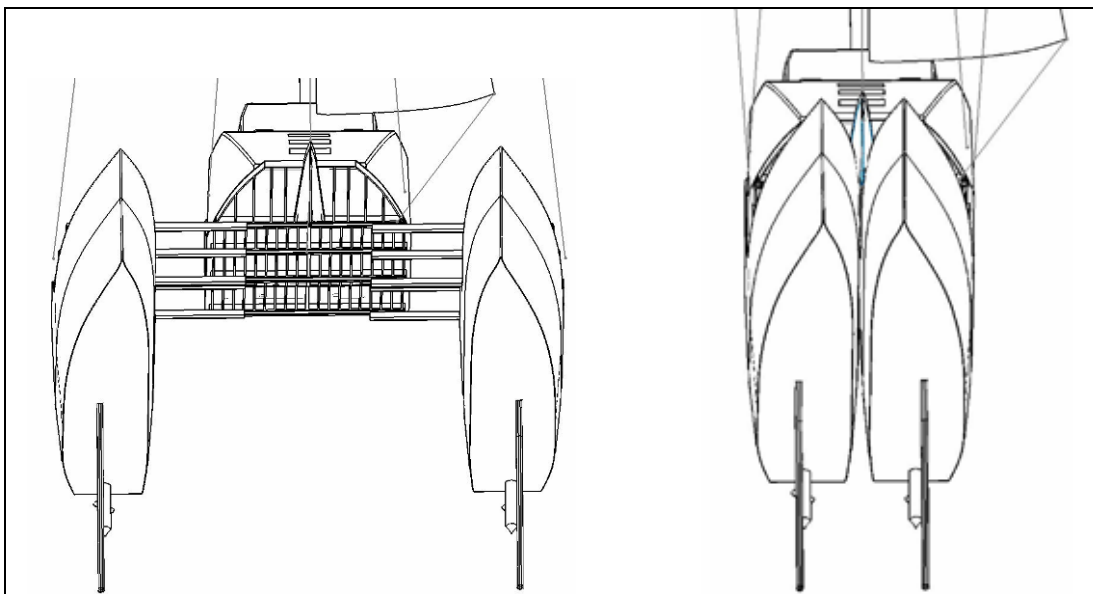


Abbildung 5-8: Bewegung der Schwimmer (2. Entwicklungsstufe, Sicht von unten)

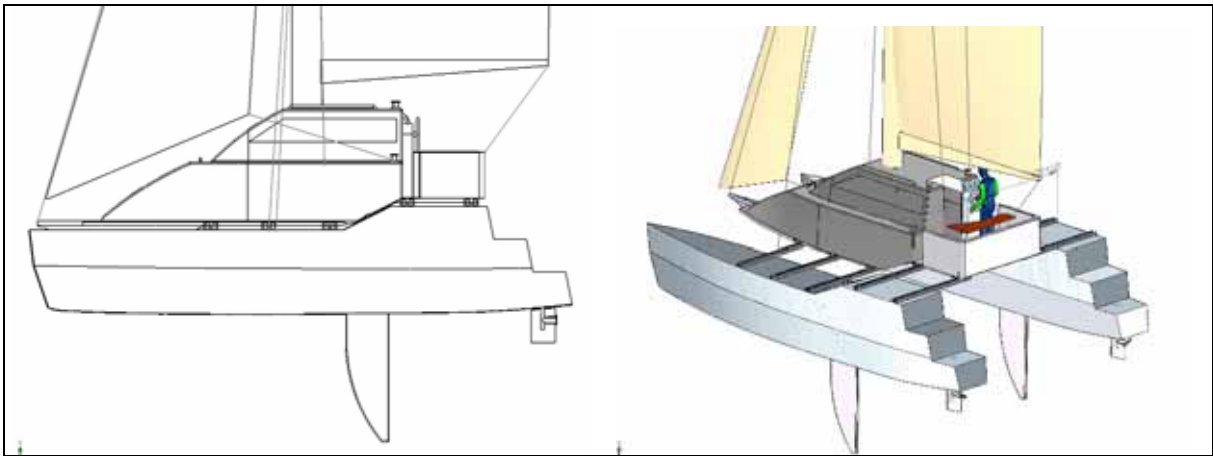


Abbildung 5-9: Deckaufbau (2. Entwicklungsstufe)

Des Weiteren wird der Schwimmer- und Deckaufbau etwas abgestuft (vgl. **Abbildung 5-9**). Durch diese Abstufung wirkt der Katamaran weniger klobig und es wird eine personengerechte Stehhöhe sowohl im hinteren Schwimmbereich wie auch im mittleren Kajütenbereich erreicht. Allerdings führte die Überprüfung der Stabilität wegen des geringen Überstandes der Streben zum Deckaufbau im ausgefahrenen Zustand zu einem negativen Ergebnis. Unabhängig von diesem Defizit beinhaltet dieses Konstruktionsprinzip noch ein weiteres Problem, welches in der 1. Stufe nicht beachtet worden war. Der Mechanismus für das Ineinanderschieben der Schwimmer kann durch Sand und Salz erheblich beeinträchtigt werden.

### **3. Entwicklungsstufe**

Um die auftretenden Probleme der 1. und 2. Entwicklungsstufe im Zusammenhang mit dem Ineinanderschieben der beiden Schwimmer in Punkto Stabilität und Lagerung wird nun ein Mechanismus mit 4 Gelenkarmen (vgl. **Abbildung 5-10**) ähnlich wie bei einer Markise angedacht. Die Lagerungen an dem Deckaufbau und an den Schwimmern sind sehr einfach realisierbar. Durch diese Vorgehensweise wird eine wesentlich größere Abstandsdifferenz zwischen den beiden Zuständen „Ausgefahren“ und „Eingefahren“ erreicht. Da aber der zu entwickelnde Katamaran voll hochseetauglich sein soll, muss der Mechanismus zum Zusammenfahren der Schwimmer optimal ausgelegt werden und jede zusätzliche Schwachstelle, wie z.B. Gelenke oder Lagerungen, müssen deshalb möglichst vermieden werden. Dem gegenüber tritt das Problem der Schmutzanfälligkeit aus der vorherigen Entwicklungsstufe hier nicht mehr auf. [25]

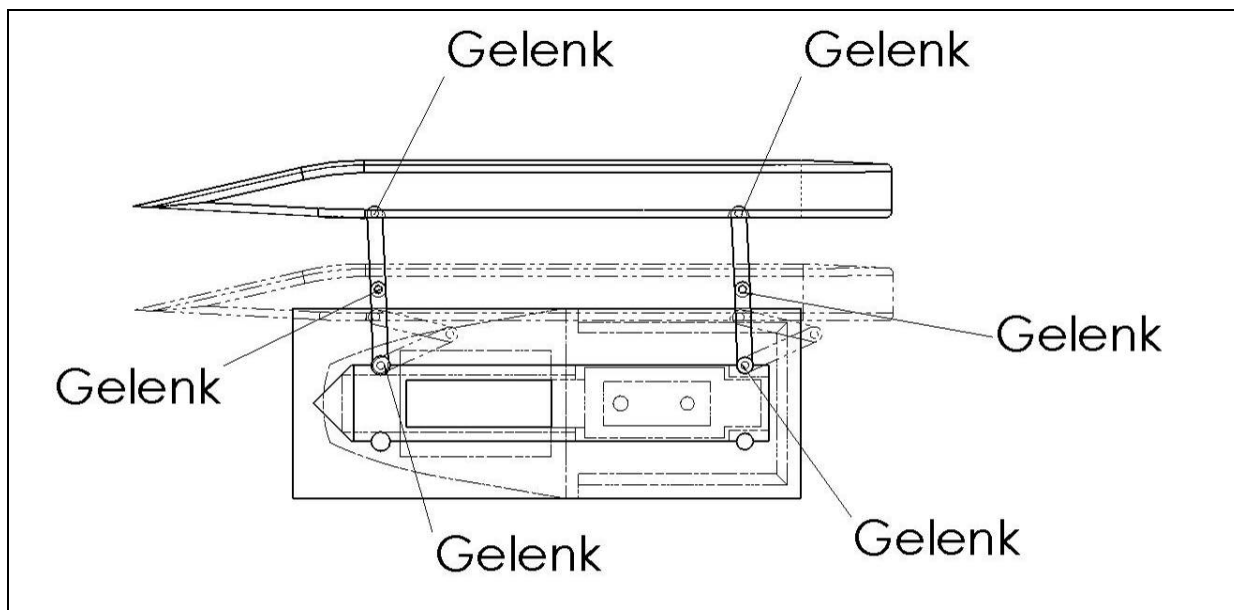


Abbildung 5-10: Klappmechanismus mit 4 Gelenkarmen (3. Entwicklungsstufe, Sicht von oben)

Damit jedoch die Schwimmer und die vier Gelenkarme auf jeder Seite zusammengefahren komplett unter dem Deckaufbau verschwinden können, kann der stufige Aufbau wie in der 2. Entwicklungsstufe hier nur schwer realisiert werden. Ferner ist für Eigenschaften von Schiffen neben einem optimal geformten Rumpf auch die Aerodynamik, also der Windwiderstand, enorm wichtig. Deshalb muss in einer weiteren Entwicklungsstufe der Deckaufbau möglichst flach gehalten werden. Die Forderung nach einer flachen Bauhöhe schließt allerdings eine personengerechte Stehhöhe sowohl in der Kajüte als auch in den Schwimmern aus.

#### **4. Entwicklungsstufe**

In dieser Stufe werden die vier Gelenkarme auf jeder Seite durch zwei Gelenkarme ersetzt, die nur jeweils vorn und hinten, symmetrisch am Deckaufbau und an den Schwimmern gelagert sind (vgl. **Abbildung 5-11**). So werden die beiden Schwimmer nach hinten geklappt. Durch diese Vorgehensweise ist die Erreichbarkeit der Schwimmer durch die Heckluke auch im zusammengeklappten Zustand jederzeit gegeben.

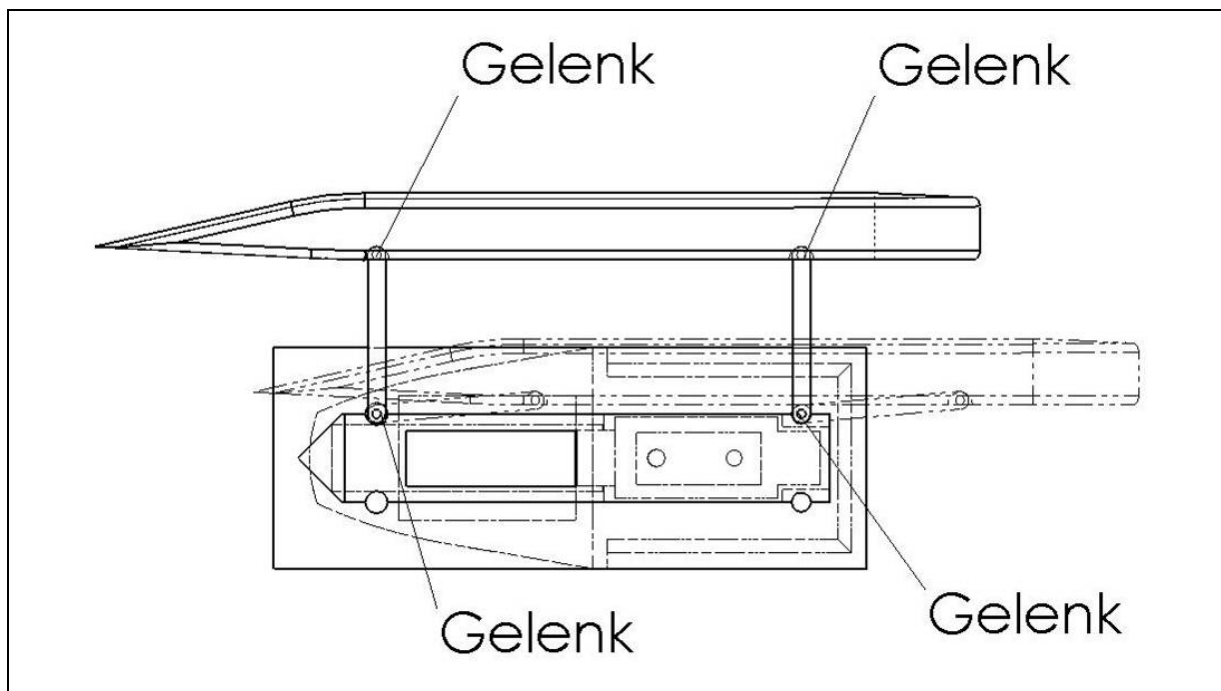


Abbildung 5-11: Klappmechanismus mit 2 Gelenkarmen (4. Entwicklungsstufe, Sicht von oben)

Dieses Konzept wird für eine weitere Detaillierung als „richtige“ Lösung angenommen, da sie allen Forderungen gerecht wird. Nachfolgend wird nunmehr nur noch diese Entwicklungsstufe weiter detailliert untersucht und der weitere Aufbau des „*neuen Klappmechanismus*“ integriert in einen Katamaran genau beschrieben.

### 5.3 Beschreibung des endgültigen Aufbaus eines trailerbaren Katamarans

Die **Abbildung 5-12** zeigt den neu konzipierten trailerbaren Katamaran mit einer variablen Breite in einem eingefahrenen Zustand. Dieser Katamaran hat 2 bewohnbare Schwimmer (Pos. 3 und 4) und einen weitestgehend offenen Deckbereich (Pos. 1) mit achterlichem, zentralem Cockpit (Pos. 5) und einem Steuer (Pos. 7). Die Schwimmer können mittels eines Mechanismus komplett unter den Deckaufbau (Pos. 1) bewegt werden, wodurch eine für den Transport vertretbare Breite (ca. 2,5 m) gewährleistet wird. Jeder der beiden Schwimmer ist mit 2 Gelenkarmen (Pos. 2) mit dem mittleren Deckaufbau formschlüssig verbunden (**Abbildung 5-13**).



Die Querstreben sind vorn und hinten sowohl unter dem mittleren Deckaufbau als auch an den Schwimmern drehbar in der vertikalen Achse gelagert. Dadurch wird ein horizontales und gleichzeitig - zu der von vorn nach hinten verlaufenden Mittelachse - paralleles Ein- und Ausklappen der beiden Schwimmkörper ermöglicht. Die Schwimmer weisen in ausgeklapptem Zustand eine Breite von über 6 Metern auf, um so eine sichere Fahrt unter Segel (Pos. 6) zu gewährleisten und ein eventuelles Umkippen auch ohne die Verwendung eines Kiels weitestgehend auszuschließen.

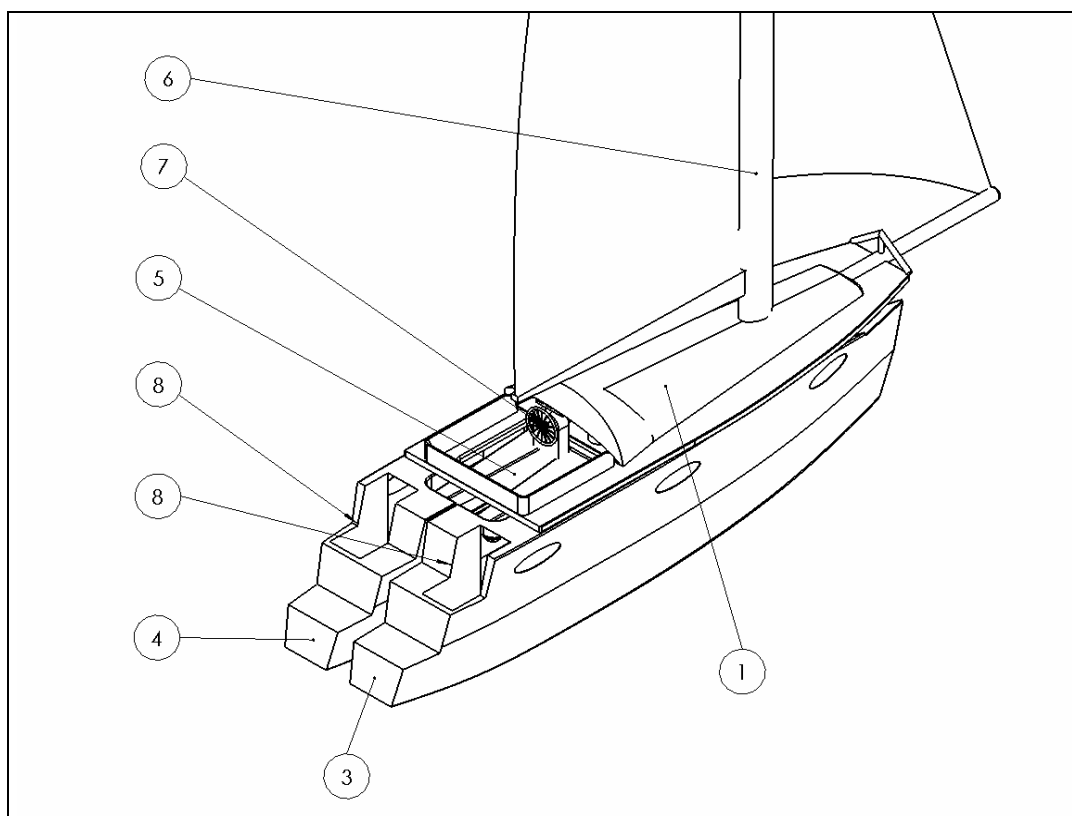


Abbildung 5-12: Zustand "Eingefahren"

Die beiden Schwimmer sind jeweils über eine Luke (Pos. 8) im Heckbereich zu betreten; die Raumaufteilung umfasst nach dem Abgang, Kombüse, Toilette, Doppelkojen, etc.. Die Luken sind über einen Deckel / Tür wasserdicht verschließbar. Die Schwimmer sind sowohl im eingefahrenen Zustand (vgl. **Abbildung 5-12**) als auch im ausgefahrenen Zustand (vgl. **Abbildung 5-13**) durch eine Luke (Pos. 8) zu begehen und ohne Einschränkungen voll nutzbar. Der in den Schwimmern befindliche Wohn- und Schlafbereich ist daher ähnlich wie ein Wohnwagen nutzbar, wenn dieses Schiff z.B. auf einem Trailer oder zusammengeklappt im Hafen liegt.

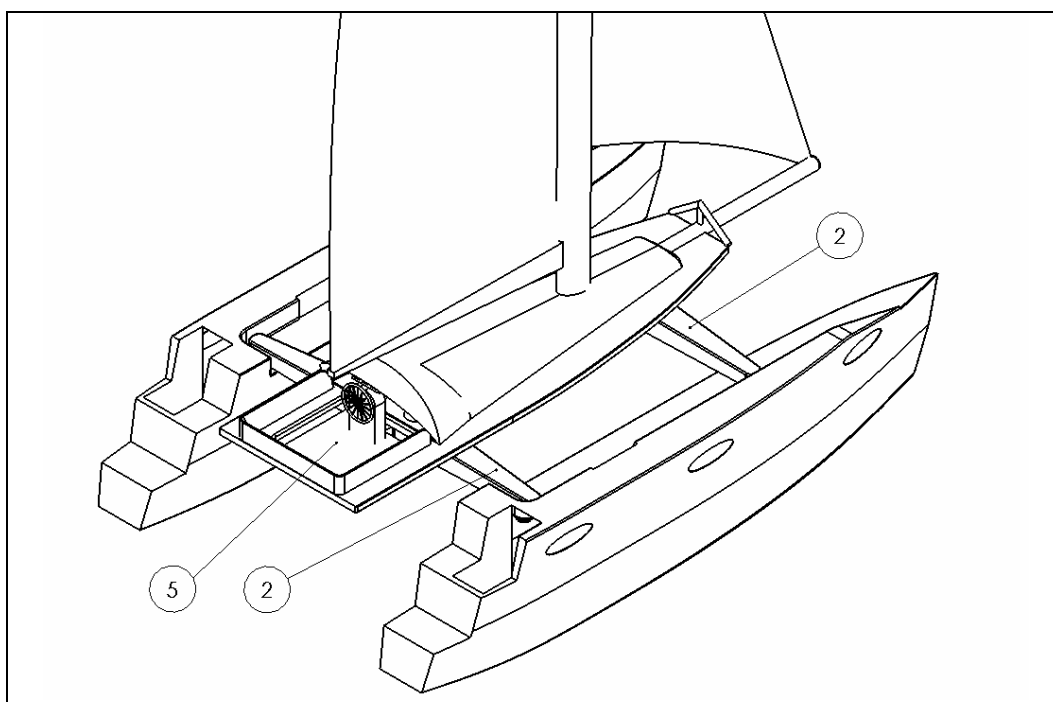


Abbildung 5-13: Zustand "Ausgefahren"

Der Katamaran ist auch in zusammengeklapptem Zustand (vgl. **Abbildung 5-14**) als Boot zu benutzen und fahrbar, allerdings dann nur unter Motor und nicht unter Segel. Die Betätigung des Mechanismus zum Ein- und Ausfahren der beiden Schwimmer erfolgt über Leinen und den entsprechend angebrachten Umlenkrollen und kann über die häufig an Bord befindlichen Winschen (Segelwinden) erfolgen. Diese Vorgehensweise spart Gewicht und Platz und ist technisch weniger anfällig.

In der ein- und ausgefahrenen Endstellung der beiden Schwimmer werden jeweils alle 4 Gelenkarme (Pos. 2) mit dem mittleren Deckteil (Pos.1) vorne und hinten miteinander lagernd verbunden und so am Deckteil fest arretiert. Dies geschieht vorzugsweise durch einen Schraub- oder Klemmmechanismus. Dadurch ist zum einen ein unbeabsichtigtes Zusammenfahren der Schwimmer z.B. bei hoher See ausgeschlossen und zum anderen werden auch die Stabilität und damit die Belastbarkeit der Querstreben bei gleicher Dimensionierung und Materialwahl gesteigert.

Durch eine rechnerisch konkretisierte Dimensionierung und eine geeignete Materialauswahl von Deckaufbau, Schwimmern, Verbindungsstreben und vor allem deren Verbindungen wird die absolute Seetüchtigkeit des Fahrzeugs gewährleistet. Zur Herstellung der Querstreben (Pos. 2) wird ein sich zum Schwimmer hin verjüngendes Hohlprofil aus einem leichten, seewasserbeständigen Werkstoff mit hohen Festigkeitseigenschaften verwendet.

Der Deckaufbau muss gerade im Bereich der Lageraufnahmen der Querstreben und Segel / Mast (Pos. 6) sehr hohe Kräfte aufnehmen und erheblichen Belastungen auf Zug, Druck, Dauerschwingfestigkeit, Verbiegen etc. standhalten. Daher sind auch hier Werkstoffe mit vergleichsweise hohen Festigkeitseigenschaften und geringem Gewicht, wie spezielle Aluminiumlegierungen oder GFK / Karbon, vorzugsweise in Leichtbauweise zu verwenden. Die geometrische Gestaltung der Bauteile muss durch eine hinreichende FEM-Berechnung optimiert werden.

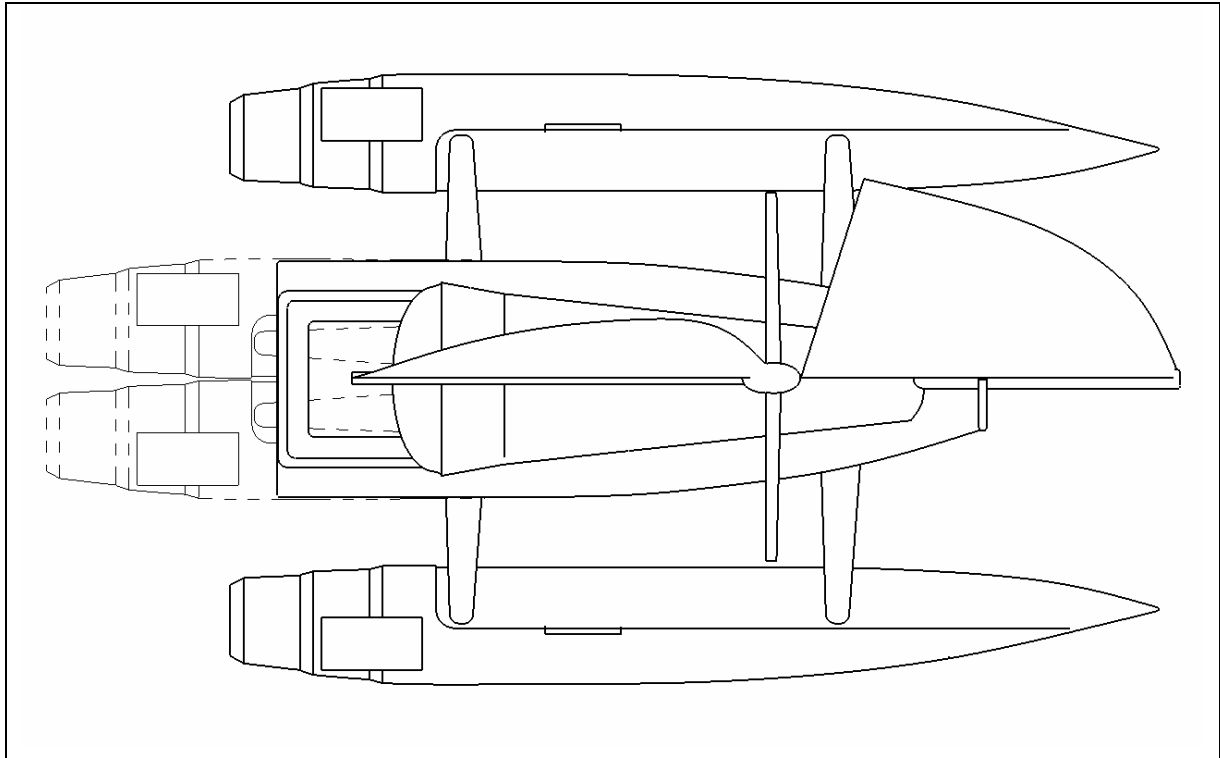


Abbildung 5-14: Vereinfachte Darstellung der beiden Zustände

Die Querstreben werden am mittleren Deckaufbau und an den Schwimmern so gelagert, dass neben der Stabilität und Seewasserbeständigkeit auch ein vergleichsweise leichter Lauf beim Ein- und Ausklappen gewährleistet ist. Das kann durch die Nutzung von Gleitlagern und entsprechende Lagerwerkstoffe oder auch durch Wälzlager sichergestellt werden.

Um dem flachen Deckaufbau weiter gerecht zu werden und den Schwerpunkt zu vertiefen, muss der Boden im Cockpit absenkbar gestaltet werden, so dass hier eine angenehme Sitzposition für die Crew bei Segelfahrt und ausgeklappten Schwimmern gewährleistet ist. Ferner muss der Boden so gearbeitet sein, dass immer ein fester Stand sichergestellt ist und durch Verwendung eines flexiblen wasserdichten Gewebematerials zwischen Boden und Sitzbänken kein Wasser von unten z.B. durch Wellen eintritt.

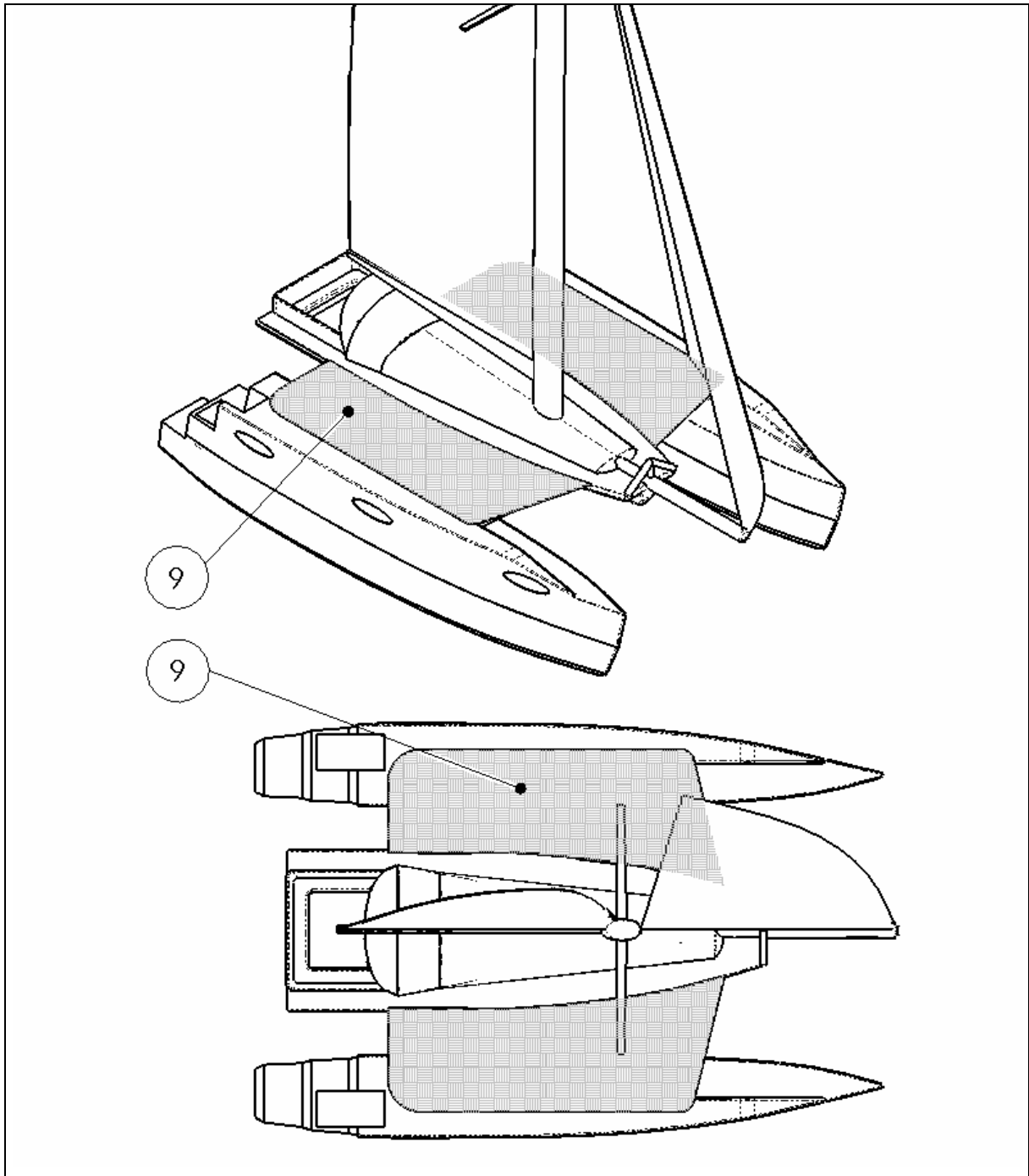


Abbildung 5-15: Gesamtdarstellung von oben

Zum Zusammenfahren der Schwimmer wird der Boden angehoben und in der oberen Stellung fixiert, um die Schwimmer und Gelenkarme komplett unter die mittleren Deckeinheit zu fahren und so die angestrebte minimale Transport- und Liegebreite zu erreichen. In den Bereichen zwischen dem mittlerem Deckaufbau und den beiden Schwimmern wird ein so genanntes Trampolin (vgl. **Abbildung 5-15**, Pos. 9), also eine begehbare textile Faser, angebracht, die diesen Bereich im ausgefahrenen Zustand der Schwimmer als Steh-, Geh- und Liegefläche nutzbar macht. Dadurch wird das Erreichen der beiden Schwimmer vom

mittleren Deck- und Cockpitbereich vereinfacht und auch zusätzlicher Platz für Manöver wie Segel setzen oder wechseln etc. geschaffen und nutzbar gemacht.

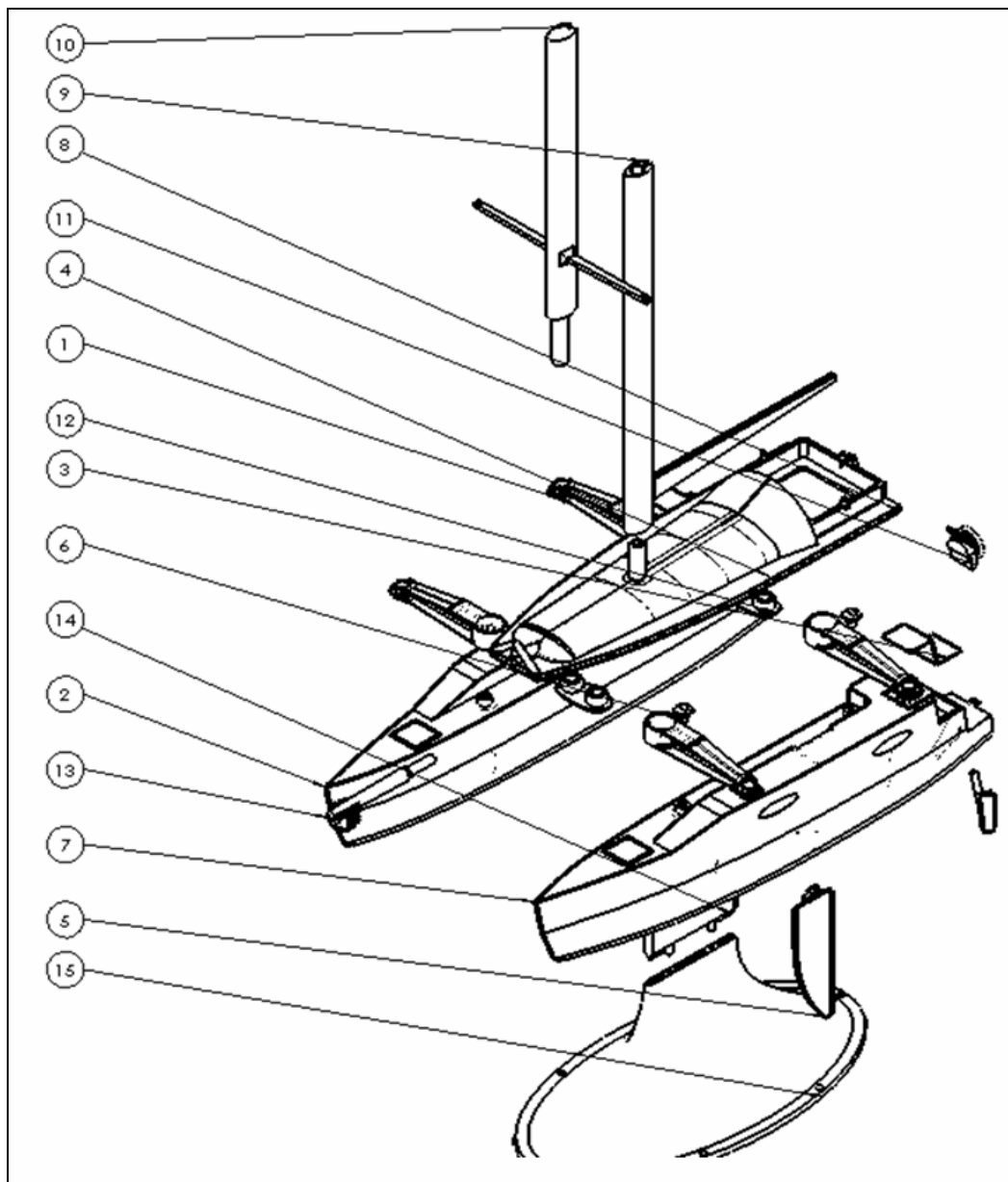


Abbildung 5-16: Explosionszeichnung des Katamaran-Modells

Das konstruktive Konzept des neuen Katamarans ist gemäß den eingangs aufgestellten Anforderungen abgeschlossen. Nun gilt es mit Hilfe von Detailkonstruktionen zu überprüfen, ob die eingangs geforderten Funktionalitäten auch erfüllt werden. Die **Abbildung 5-16** zeigt in einer Explosionsdarstellung die wesentlichen Einzelteile des gesamten Katamarans. Die Positionsnummern sind den Einzelteilen in der Stückliste (vgl. **Abbildung 5-17**) zugeordnet.

Pos.- Nr.	Benennung	Anzahl		Pos.- Nr.	Benennung	Anzahl
1	Gelenkarm	4		10	Segel 2	1
2	Kufe rechts	1		11	Steuer	1
3	Klappe	2		12	Kappe	2
4	Ruder	2		13	Fogg vorne	1
5	Schwert	2		14	Fuß oben	1
6	Stift	4		15	Fuß	1
7	Kufe links gespiegelt	1		16	Groß-Segel	1
8	Deck Katamaran	1		17	Segel Modell 2 SLS geglättet	1
9	Segel 1	1				

Abbildung 5-17: Stückliste des Katamaran-Modells

Damit ist die Grobgestaltung des Produktes „*Klappmechanismus*“ abgeschlossen und nun müssen die einzelnen Komponenten in dem nachfolgenden Detailprozess Produktdefinition detailliert konstruiert und die endgültige geometrische Gestalt muss anschließend hinsichtlich ihrer Festigkeit überprüft werden.

## 6 Belastungsgerechte Produktdefinition durch Anwendung der FE-Methode

Innerhalb des Detailprozesses Produktdefinition (vgl. **Abbildung 6-1** und Abbildung 3-4) müssen zunächst die folgenden Fragen geklärt bzw. die den Fragen zugrunde liegenden Sachverhalte bearbeitet und gelöst werden:

- Ermittlung der äußeren Belastung des Katamarans
- Konstruktive Detaillierung der Einzelteile
- Nachprüfen der Festigkeit der Einzelteile
- Auswahl der Werkstoffe
- Design der äußeren Optik

bevor die Produktentwicklung mit dem Detailprozess Versuch / Erprobung fortgesetzt werden kann.

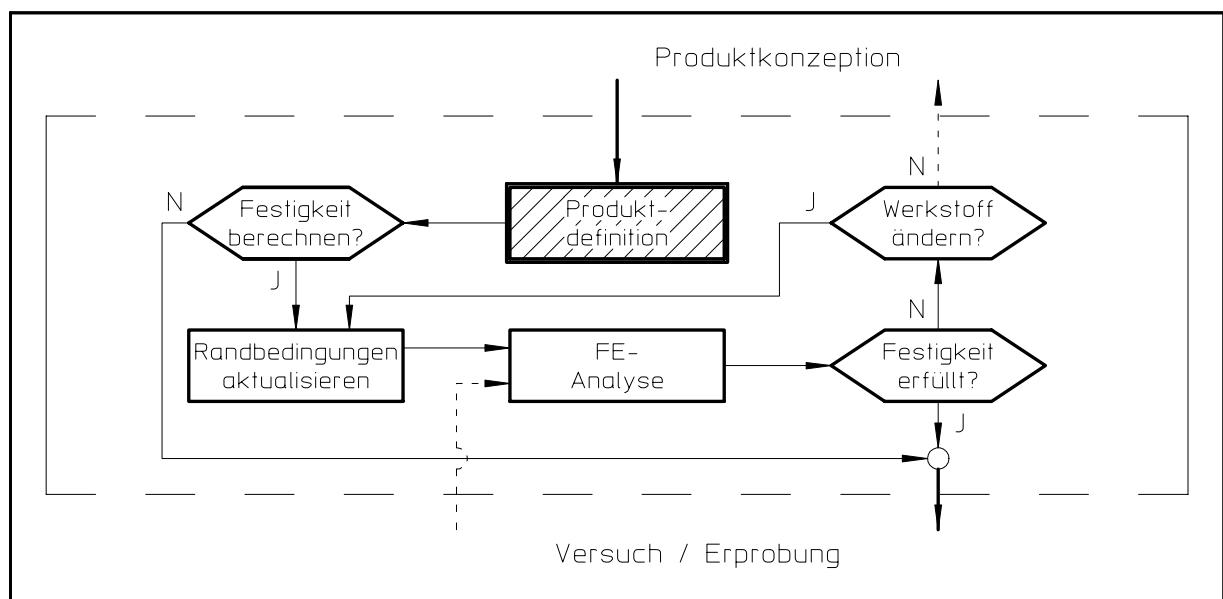


Abbildung 6-1: Phase „Produktdefinition“

In der Abbildung 6-1 werden aber auch sowohl die Wechselwirkungen mit dem Detailprozess Produktkonzeption als auch die Rückkopplung aus dem Detailprozess Versuch / Erprobung sichtbar.

## **6.1 Werkstoffe für den Bootsbau**

Damit die Neuentwicklung eines Klapp-Mechanismus für einen Katamaran hinsichtlich der Konstruktion in Verbindung mit einem ausreichenden Festigkeitsnachweis und der Fertigung ein Optimum darstellt, ist es unabdingbar, dass die jeweils zum Einsatz kommenden Werkstoffe diesen Aufgaben gerecht werden. Deshalb sind die Grundlagen der einsetzbaren Werkstoffe zu erarbeiten und auf ihre Eignung hin zu überprüfen. Welcher Werkstoff letztendlich für den Bau eines Prototyps Verwendung findet, hängt im Wesentlichen auch von dem Verhältnis von der Festigkeit und dem Gewicht (Leichtbau) zu den Herstellungskosten des ganzen Katamarans ab. Im Schiffsbau werden schwerpunktmäßig die folgenden Materialien eingesetzt:

- Holz
- Glasfaser verstärkte Kunststoffe (GFK)
- Metall
  - Stahl
  - Alu

Da nicht die tatsächliche Herstellung eines Katamarans im Vordergrund dieser Arbeit steht, sondern der durchgängige Produktentwicklungsprozess am Beispiel eines Klappmechanismus gezeigt werden soll, sind lediglich die Werkstoffinformationen für die hoch belasteten Komponenten, wie z.B. die Gelenkarme, die Rümpfe, die Lager und der Mast, von Interesse, da einzelne dieser Komponenten auch hinsichtlich ihrer Festigkeit nachgerechnet werden sollen. Darüber hinaus ist der Bau eines Prototyps sinnvoll, da mit diesem die tatsächliche Funktionalität besser nachgewiesen werden kann als durch eine rechnergestützte Simulation. Der Prototyp kann entweder aus Holz oder verschiedenen Kunststoffen auf unterschiedliche Art und Weise gefertigt werden.

Das Material Holz ist allerdings sehr differenziert zu betrachten, da es sehr viele unterschiedliche Holzarten und ebenso viel verschiedene Bauarten gibt. Holz ist ein recht wartungs- und pflegeintensiver Werkstoff, und so muss ein Holzrumpf mindestens einmal pro Jahr abgeschliffen und lackiert werden, was einem modernen und praktischen Segelkonzept nicht unbedingt entgegen kommt.

Wegen des angestrebten Leichtbaus scheidet bei den Metallen Stahl als Werkstoff von vornherein aus, da ein Schiff aus Stahl bei gleicher Größe und ähnlicher Festigkeit etwa das Doppelte wiegt gegenüber einem Schiff aus Alu oder GFK. Deshalb werden ca. 85 %



aller Boote aus GFK hergestellt (vgl. [27], S. 243). Der Vorteil von GFK ist nicht nur durch seine hohe Festigkeit bei einem geringen Gewicht gegeben, denn darüber hinaus kann mit dem Werkstoff GFK nahezu jede beliebige Form ohne Beulen und Unebenheiten modelliert werden.

Hingegen ist der Einsatz von Alu für einen Bootsrumpf äußerst schwierig, da Alu sich nicht in jede beliebige Form bringen lässt, sehr stark rückfedert und bei Wärmebehandlungen wie z.B. Schweißen sehr hohe Spannungen entstehen, die dann Verzug und Beulen zur Folge haben können. Für stark belastete Teile wie die Gelenkarme des geplanten Klappmechanismus hingegen kommt es als Werkstoff durchaus in Frage, da hier hohe Festigkeiten erreicht werden müssen. Auch für den Bau eines Mastes hat sich Alu durchgesetzt. In jüngster Zeit werden Masten auch aus CFK hergestellt, die bei etwa 10 % Gewichtseinsparung bei gleicher Festigkeit mit dem etwa dreifachen Preis gegenüber einem Mast aus Alu zu Buche schlagen. Wesentlich für den Einsatz des bestmöglichen Materials an den verschiedenen Stellen eines Segelbootes ist die jeweils erforderliche Festigkeit bezogen auf die Zugbeanspruchungen oder auch die Druckbeanspruchungen wie in **Abbildung 6-2** dargestellt. Die jeweils kleineren Werte geben die Druckfestigkeit wieder.

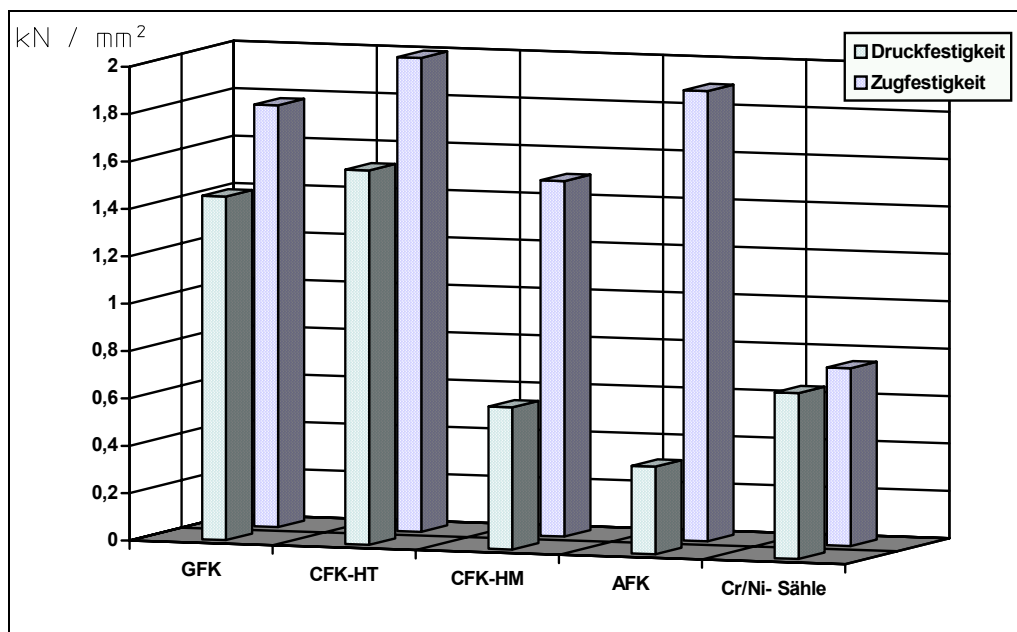


Abbildung 6-2: Zug- und Druckfestigkeit von Bootsbauwerkstoffen [26, S. 85]

Zur genauen Ermittlung der Festigkeiten für die in Frage kommenden Materialien ist das Einbeziehen der im April 2006 veröffentlichten DIN Norm: EN ISO 12215-9 [29] sehr hilfreich. Für kleine Wasserfahrzeuge – Rumpfbauweise und Dimensionierung – Teil 9: Segelboote –

Anhänge und Takelagezubehör (ISO / DIS 12215-9:2005); Deutsche Fassung prEN ISO 12215-9:2006 [29] gelten die Konstruktionsbelastungswerte gemäß der Tabelle 3 in der **Abbildung 11-5**.

Wie bereits erwähnt, wird GFK zu 85 % im Bootsbau eingesetzt und ist daher nicht ohne Grund der Spitzenreiter. Im Wesentlichen werden die Harzsorten Polyesterharz, UP und Epoxyharz verwendet. Die Harzsorte EP besitzt zwar gegenüber dem UP bessere mechanische Eigenschaften, ist allerdings auch teurer. Aus der Tabelle in der **Abbildung 6-3** lässt sich erkennen, dass Epoxyharz verglichen mit Polyesterharz einen wesentlich höheren E-Modul und eine 4 mal geringere Wasseraufnahme hat, welche es zu einem optimalen leichten, festen Werkstoff für einen Rumpf macht. Polyesterharz hingegen ist wesentlich druckfester und dadurch ein guter Werkstoff für einen Deckaufbau, der unter anderem durch das häufige Betreten erheblichen Druckbelastungen ausgesetzt ist. Dagegen ist die recht geringe Zugfestigkeit der Harze von unter  $100 \text{ N/mm}^2$  nicht besonders gut.

	<b>Polyesterharz</b>	<b>Epoxyharz</b>
E-Modul	3200-3800 $\text{N/mm}^2$	5000 $\text{N/mm}^2$
Zugfestigkeit	50-80 $\text{N/mm}^2$	70 $\text{N/mm}^2$
Druckfestigkeit	120-180 $\text{N/mm}^2$	100 $\text{N/mm}^2$
Wasseraufnahme	0,4 %	0,1 %

Abbildung 6-3: Gegenüberstellung Polyesterharz zu Epoxyharz: ([27], S. 267)

Damit eine wesentlich höhere Festigkeit erreicht werden kann, wird mit dem Harz eine Matte getränkt, die aus unterschiedlich angeordneten Glasfasern besteht. Dies wird je nach Beanspruchungsrichtung unidirektional oder auch diagonal auf unterschiedliche Arten verwebt. Eine UHM-Faser erreicht eine Zugfestigkeit von  $2000 \text{ N/mm}^2$ , eine HF-Faser sogar  $3500 \text{ N/mm}^2$  ([27], S. 274). In der Praxis arbeiten die Bootbauer mit den Anbietern der Harzsysteme eng zusammen. Der Harzanbieter empfiehlt dann je nach Größe und Zielsetzung des zu bauenden Schiffes das optimale Harz.

Als Metalle werden im Bootsbau legierte Stähle und Leichtmetalle eingesetzt. Die EN ISO 12215-9 schreibt für den Bau von Schiffen und Yachten Schiffbaustahl mit besonderen mechanischen Eigenschaften vor. Die Tabelle in der **Abbildung 6-4** zeigt eine Übersicht der Metalle, die im Bootsbau für die Fertigung von Bootsbeschlägen und somit auch für Gelenkarme geeignet sind. Die Beständigkeit gegen Korrosion wird durch die Beimengung von Nickel und / oder Chrom erreicht. Bei Stählen mit Chrom-Nickel-Anteilen  $>12\%$  wird in

der Regel kein Rost mehr auftreten, da der Legierungsbestandteil Nickel die Widerstandsfähigkeit gegen Säuren erhöht.

**Tabelle A.1 — Werte von  $\sigma_d$ ,  $\tau_d$ ,  $\sigma_{db}$ ,  $\sigma_{d\text{ welded}}$  und für typische Metalle – Verformungsbruch**

Werkstoff	Chemische Zusammen- setzung	$\sigma_u^a$	$\sigma_y^a$	$\sigma_u^a$ geschweißt	$\sigma_y^a$ geschweißt	$\sigma_d^a$	$\tau_d^a$	$\sigma_{db}$ gelagert	$\sigma_{d\text{ welded}}$ ge- schweißt
Nicht rostender Stahl									
AISI 304	X5 Cr Ni 18.9,	500	195	195	195	176	102	316	98
AISI 316, 316 L	X5 Cr Ni Mo 17.2.2	500	195	195	195	176	102	316	98
AISI 329 not cold worked	X3Cr Ni Mo N 27-5-2	650	500	500	500	325	189	585	250
17-4 PH, F16 PH	X5 Cr Ni Cu Nb 16.4	1 000	720	Not recommended		500	290	900	
DX45, Uranus <sup>b</sup>	X2 Cr Ni No N 22.5.3	660	450	450	450	330	191	594	225
Unlegierter Stahl									
E24 / A		400	235	400	235	200	116	360	200
E32 - AH 32		470	315	470	315	235	136	423	235
E36 - AH 36		490	355	490	355	245	142	441	245
<b>Aluminium</b> Legierung Serie 5 000									
5086 0/H111	Al,Mg,4	240	100	240	100	90	52	162	90
5086 H32	Al,Mg,5	275	185	240	100	138	80	248	90
5083 0/ H111	Al,Mg,4,5 Mn 07	275	125	125	125	113	65	203	63
5083 H32	Al,Mg,4,5 Mn 07	275	125	125	125	113	65	203	63
5059 Alustar 0/H111	Al, Mg, 5-6	290	145	290	145	131	76	235	131
5059 Alustar H32	Al, Mg, 5-6	305	220	290	145	153	88	275	131
<b>Aluminium</b> Legierung Serie 6 000									
6005 A T6	Al, Si, Mg (A)	260	215	165	115	130	75	234	83
6061 T6	Al, Mg1,Si,Cu	260	240	165	115	130	75	234	83
6082 T6	Al, Mg1,Si,Mn	310	260	170	115	155	90	279	85
Titanlegierung									
UTA6V		900	820			450	261	810	450
Kupferlegierung									
Bronze-Manganese		510	245			221	128	397	221
Bronze-Ni-Al		740	390			351	204	632	351
Monel 400		550	350			275	160	495	275
Monel 500		960	690			480	278	864	480
Lead-Antimony									
Pure Lead	Alloys	18				9	5	16	9
Lead with 1% Antimony		20				10	6	18	10
Lead 96 % with 4 % Antimony (Hard Lead)		80				40	23	72	40
Für Werkstoffe mit Dehnungsbruch $\sigma_u = \min(0,5\sigma_u, 0,9\sigma_y)$ $\tau_u = 0,58 \sigma_u$ $\sigma_{u\text{ welded}} = 1,8 \sigma_u$									
a) Bestandteile im ungeschweißten Zustand.									
b) Geschweißt in neutraler Atmosphäre (Argon).									

Abbildung 6-4: Werkstoffe im Schiffsbau [29]

Aluminium ist ein noch recht junges industrielles Gebrauchsmetall. Es wurde erstmals 1825 von dem dänischen Forscher H. C. Oerstedt hergestellt; wenige Jahrzehnte später gelang die Produktion im großtechnischen Maßstab. Seine hervorragenden Materialeigenschaften haben Aluminium innerhalb von nur 100 Jahren zu einem vielseitigen und weit verbreiteten Gebrauchsmetall gemacht. Bezüglich der Eigenschaften zählt Aluminium mit seiner geringen Dichte zu den Leichtesten unter den Metallen und weist dabei eine recht hohe Festigkeit auf. An der Luft überzieht sich das Metall mit einer dünnen Oxidhaut, durch die es meist

korrosionsbeständig wird. Aluminium ist sehr gut kalt und warm verformbar, lässt sich schweißen und schmieden und besitzt eine hohe Leitfähigkeit für Strom und Wärme.

Im Bootsbau verwendete Aluminiumlegierungen müssen einer Meerwasserbeständigkeit nach DIN 1725 entsprechen. Durch die Beimengung von Legierungsbestandteilen wird eine Erhöhung der Festigkeit gegenüber Reinaluminium erreicht, ohne dass das geringe spezifische Gewicht nennenswert erhöht wird. Meerwasserbeständig sind die nachfolgenden Aluminiumlegierungen im Sinne der DIN 1725 [30]:

- AlMgSi 0,8
- AlMgSi 1
- AlMgSi 4,5 Mn
- AlMg 3
- AlMg 5
- AlMg2Mn0,3
- AlMn1Mg1
- AlMn

Durch den Einsatz von Aluminiumlegierungen gegenüber Stahl können bei gleicher Festigkeit über 60 % Gewicht eingespart werden. Bei sehr festen, leichtgewichtigen Legierungen; die einer Lösungs- und Aushärtungsbehandlung unterzogen sind, können die mechanischen Eigenschaften so gut oder sogar besser als die von kohlenstoffarmem Stahl sein.

In Bezug auf die Korrosionseigenschaften von Aluminium ist allgemein bekannt, dass Aluminium und seine Legierungen an der Witterung und auch in vielen sonstigen Anwendungsbereichen hervorragende Korrosionseigenschaften aufweisen, die ihre universelle Verwendung begünstigen. Sehr gut beständig sind die AlMg und AlMn - Legierungen, die auch in Seewasser eingesetzt werden können. Die Legierungen vom AlMgSi - Typ können in Bezug auf Korrosion als gut bezeichnet werden. Für eine allgemeine Korrosionsbeständigkeit sind auch die AlZnMg - Typen noch gut beständig. Im Allgemeinen schlecht beständig sind die kupferhaltigen Legierungen, die daher meist geschützt werden müssen.

Nach der hier wiedergegebenen Gegenüberstellung hinsichtlich der verschiedenen GFK- und Alu-Legierungen soll die bestmögliche Wahl der jeweils passenden Werkstoffe für die beiden Rümpfe, den Deckaufbau und vor allem die später hoch belasteten Verbindungsarme

und die Aufnahmen im Deckaufbau getroffen werden, denn die Wahl der Werkstoffe beeinflussen auch die genaue Formgebung, das Gewicht und die Möglichkeiten der Verarbeitung.

Mit der Erfahrung des Verfassers und dem Fazit aus vielen Gesprächen mit erfahrenen Bootsbauern werden die folgenden Werkstoffe ausgewählt:

Die **Rümpfe** werden aus GFK gefertigt, und zwar speziell für den:

Unterwasserbereich: Iso-NPG Harz NORPOL 20-80 und das  
Vinylesterharz auf Bisphenol A Basis PLATAL A 430-01, GFK  
und  
oberhalb der Wasserlinie: Iso-Standardglykol Harz OLDOPAL L 425 für Faserverbundteile

Für die **Gelenkarme**, also die Verbindung der Rümpfe mit dem Deck und für die Mechanik wird ein korrosionsbeständiges Aluminium gewählt, welches der Festigkeit eines Stahls entspricht und gut bearbeitbar ist und bei dem auch nachträglich noch Halter, Ösen, Aufnahmen usw. angeschweißt werden können. Dies ist schon deshalb sinnvoll, da häufig nach dem Bau eines Prototyps weitere Optimierungen bis zum endgültigen Produkt vorgenommen werden müssen. Als Werkstoff für die Gelenkarme ist entsprechend der EN ISO 12215-9 ein 5086 H 32 (**Al Mg 5**) mit einer Zugfestigkeit von  $275 \text{ N/mm}^2$  vorgesehen (vgl. Abbildung 6-4).

## **6.2 Belastungen an einem Segelschiff**

Obwohl der Schwerpunkt des Konzeptes auf der konstruktiven Gestaltung eines Klappmechanismus für einen Katamaran liegt, so wird auch hier, wie für jede andere Konstruktion, die Art und die Größe der Belastungen benötigt, die auf die zu konstruierenden Komponenten wirken. Die genaue Ermittlung dieser Belastungen ist allerdings das größte Problem bei der Konstruktion von Booten. Einerseits ist der tatsächlich auftretende Wind wegen der häufig wechselnden Windrichtungen und den nicht zu unterschätzenden Windböen nicht immer genau zu bestimmen und andererseits wirken auch noch Kräfte auf das Boot, die sich aus den Bewegungen des Wassers in Form von Wellen ergeben, die ebenfalls in Form und Stärke variieren können. Für die Berücksichtigung dieser äußeren Einflüsse bedarf es seitens des Konstrukteurs sehr viel Erfahrung, damit ein sicheres Boot entsteht.

Nach [29] gelten zur Auslegung und Berechnung von Booten die nachfolgend beschriebenen Entwurfskategorien:

Eine Entwurfskategorie ist dabei wie folgt definiert: See- und Windverhältnisse, für die ein Boot nach dieser internationalen Norm geeignet ist, vorausgesetzt, das Boot wird im Sinne einer guten Seemannschaft ordnungsgemäß behandelt und bei einer dem vorherrschenden Seegang angemessenen Geschwindigkeit betrieben.

Entwurfskategorie A (.See—): Eine Bootsklasse, die für eine Wellenhöhe von mehr als 4 m und eine Windgeschwindigkeit von mehr als Windstärke 8 geeignet ist, ausschließlich abnormaler Verhältnisse wie zum Beispiel Orkane.

Entwurfskategorie B (.offshore—): Diese Bootsklasse ist geeignet für Wellenhöhen bis 4 m und eine Windgeschwindigkeit bis Windstärke 8 oder weniger.

Entwurfskategorie C (.inshore—): Diese Bootsklasse ist geeignet für Wellenhöhen bis 2 m und eine Windgeschwindigkeit bis Windstärke 6 oder weniger.

Entwurfskategorie D (.geschützte Gewässer—): Eine Bootsklasse, die für Gewässer mit Wellenhöhen bis einschließlich 0,30 m und mit gelegentlichen Wellen bis 0,5 m Höhe (z. B. von vorbeifahrenden Schiffen) geeignet ist und eine übliche, dauerhafte Windgeschwindigkeit bis Windstärke 4 oder niedriger.

Für ein 33 Fuß großes Segelboot der Entwurfskategorie A werden beispielsweise in der Fachliteratur die Kräfte gemäß der **Abbildung 6-5** definiert.

Ein Segelschiff ist insbesondere durch den Einfluss des Windes auf das Rigg besonderen Belastungen ausgesetzt, die unbedingt bei der konstruktiven Gestaltung aller Komponenten eines Segelschiffes berücksichtigt werden müssen. So können beispielsweise bei einem American Cupper Segelschiff im Mastfuß jeweils Kräfte bis zu 54 Tonnen auftreten. Darüber hinaus können sich diese durch den Einfluss von starkem Seegang derart verstärken, dass in diesen Spitzen die Gesamtkräfte nicht mehr eindeutig berechenbar sind. Bei einem Schiff mit einer Länge von ca. 10 Metern kann nach heutiger Erkenntnis von einer maximalen Belastung im Mastfuß von gut 5 Tonnen (vgl. Abbildung 6-5) ausgegangen werden. Ob für die Kraftannahme auf einen Katamaran ähnliche Größenordnungen vorliegen, soll im Folgenden überprüft und berechnet werden.

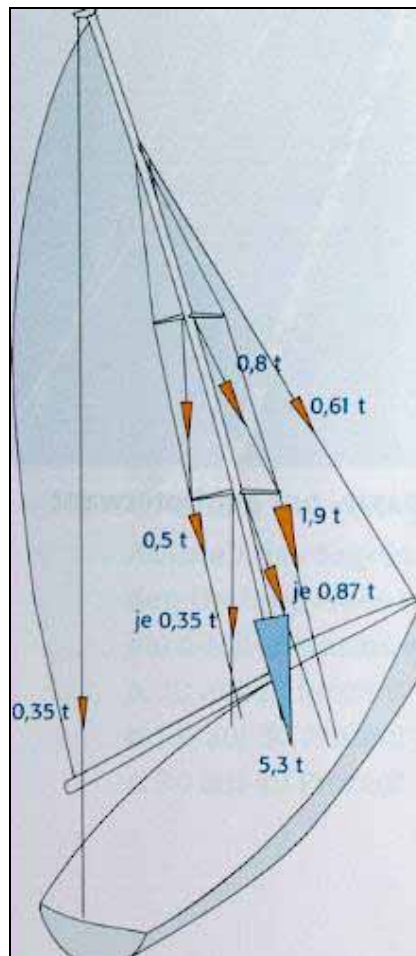


Abbildung 6-5: Kräfte im Rigg [31]

Wenn sich die tatsächliche Belastung nicht exakt ermitteln lässt, muss dies mit Hilfe von Annahmen geschehen, die auf der Erfahrung langjähriger Bootskonstrukteure beruhen. Dies bedeutet, ausgehend von der einflussreichsten Kraft im Mastfuß eines Segelschiffes kann das Eigengewicht des Schiffes und das Gewicht der Crew mit Hilfe eines Faktors berücksichtigt werden.

Weitere angreifende Kräfte sind die Zugkräfte der in der Luvseite angebrachten Wanten, die den Luvschwimmer nach oben ziehen (vgl. **Abbildung 6-6**) und die Kräfte, die auf den Leeschwimmer wirken, der durch die Krängung weiter eingetaucht ist. In der Abbildung 6-6 sind sowohl die Windkraft wie auch die Mastkraft dargestellt. Des Weiteren sind zu berücksichtigen, die Kraft des Eigengewichts in der Y-Achse und die Kräfte, die durch die Wellen entgegen der „*Abdrift*“, parallel in X-Richtung entstehen.

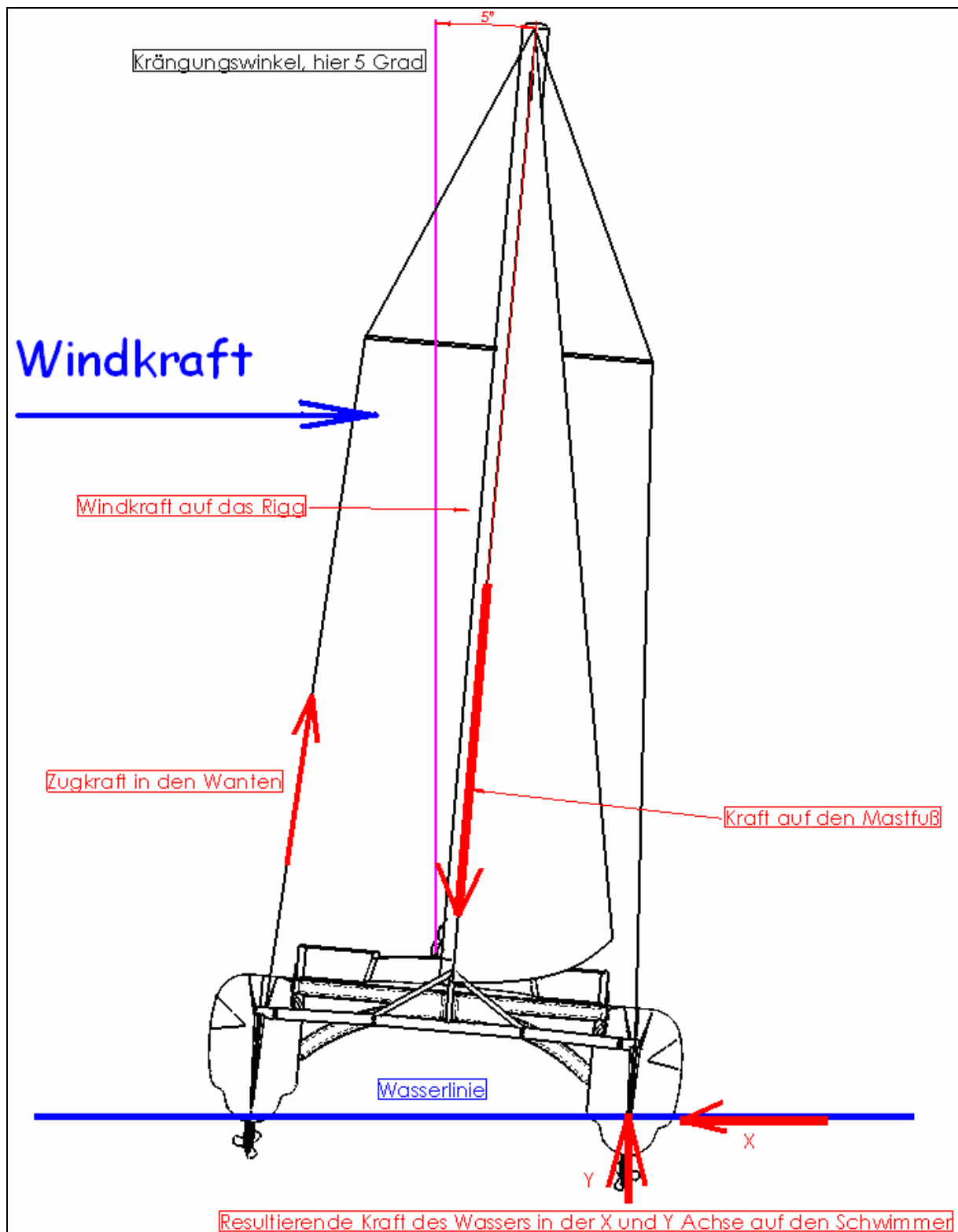


Abbildung 6-6: Belastungen eines Katamaran unter Wind

Zum besseren Verständnis kann bezüglich der Kräfte überschlägig von den folgenden Verhältnissen ausgegangen werden:



Masse pro Schwimmer = 700 kg:	1.400 kg
Masse pro Gelenkarm und Lager = 100 kg	400 kg
Masse Mitteldeckaufbau	400 kg
Masse Rigg und Leinen	300 kg
Masse Motor und Akkus	300 kg
Masse Tanks Wasser und Kraftstoff	220 kg
<u>Masse Crew (6 x 80 kg)</u>	<u>480 kg</u>

Masse des vollen gesamten Schiffes: 3.500 kg

Zur Bestimmung der auftretenden Kräfte ist zunächst die Größe der der einwirkenden Windkraft  $F$  zu berechnen. Bei einer Windgeschwindigkeit von 6 bis 7 Beaufort (vgl. **Abbildung 11-3**), also max. 30 Knoten, kann im Mittel von einem Druck  $p = 130 \text{ N/m}^2$  ausgegangen werden. Bei größeren Windgeschwindigkeiten kann die Segelfläche durch ein so genanntes Reffen verkleinert werden. Als Orientierung für die Auslegung des Katamarans wird ein Boot ähnlich dem VIK 105 (vgl. Abbildung 5-3) zu Grunde gelegt, bei dem die Segelfläche  $A = 68 \text{ m}^2$  (Focksegel =  $27 \text{ m}^2$ , Grossegel =  $41 \text{ m}^2$ ) ausgelegt ist. Somit ergibt sich für die maximal angreifende Windkraft:

$$F = p \cdot A$$

$$F_{(\text{max})} = 130 \text{ N/m}^2 \cdot (27 \text{ m}^2 + 41 \text{ m}^2)$$

$$F_{(\text{max})} = \underline{\underline{8.840 \text{ N}}}$$

Zur Berechnung der in dem Mast und in den Wanten auftretenden Kräfte wird der genaue Angriffspunkt der Windkraft, ausgehend von der Wasserlinie, benötigt. Wie in der **Abbildung 6-7** dargestellt, beträgt der Abstand zur Wasserlinie  $L = 7.400 \text{ mm}$ . Ohne die stützenden Kräfte der Wanten würde in dem Mastfuß ein Drehmoment auftreten von:

$$M = F \cdot L$$

$$M_{(\text{Mastfuß})} = 8.840 \text{ N} \cdot 7,4 \text{ m}$$

$$M_{(\text{Mastfuß})} = \underline{\underline{65.416 \text{ Nm}}}$$

Da aber der hier verwendete Mast von so genannten Wanten abgestützt wird, ist selbst bei einer hohen Belastung ein Umkippen oder auch ein Umknicken des Mastes kaum möglich. Bei einem in dem Mastfuß auftretenden Drehmoment von  $65.416 \text{ Nm}$ , einer Masthöhe von 16 Metern, einer Wantenlänge von 16,5 Metern und einem Abstand der Wantbefestigung am Schwimmer zum Mastfuß von 2,5 Metern können die auftretenden Kräfte leicht ermittelt werden (vgl. **Abbildung 6-8**).

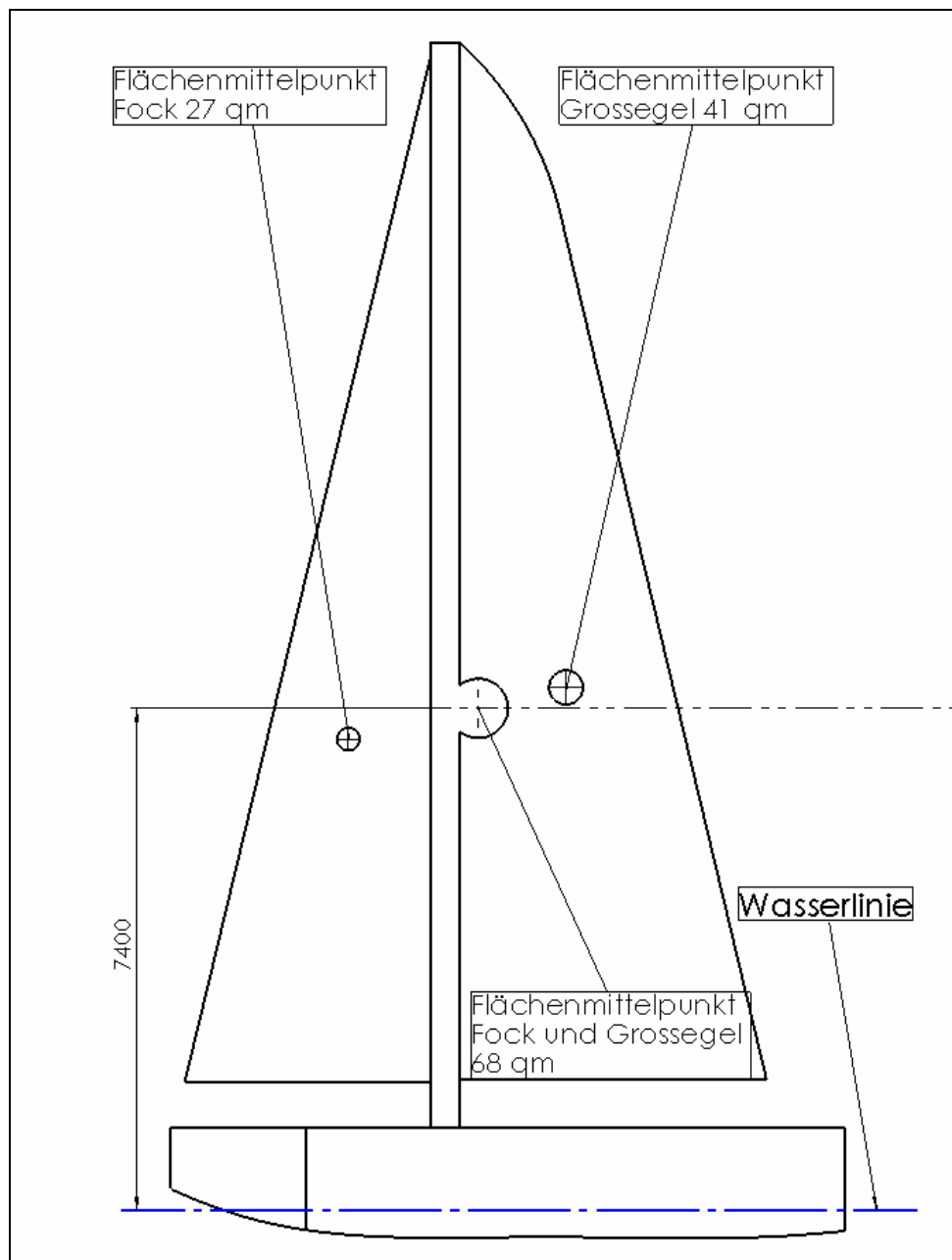


Abbildung 6-7: Flächenswerachpunkt der gesamten Segelfläche

In der dem Wind zugewandten Seite (Luv) entsteht in den Wanten eine große Zugkraft, wohingegen die Wanten in der dem Wind abgewandten Seite (Lee) so gut wie keine Kraft

aufnehmen müssen. In dem Mast hingegen entsteht eine große Druckkraft, die als Basis zur Berechnung und Auslegung der Gelenkarme benötigt wird. Wird das Moment  $M_{\text{(Mastfuß)}}$  im Mastfuß auf die gesamte Mastlänge bezogen, so ergibt sich die Kraft im Masttop zu:

$$F_{\text{(Masttop)}} = M_{\text{(Mastfuß)}} / L_{\text{(Mastlänge)}}$$

$$F_{\text{(Masttop)}} = 65.416 \text{ Nm} / 16 \text{ m}$$

$$F_{\text{(Masttop)}} = \underline{\underline{4.100 \text{ N}}}$$

Aus den geometrischen Verhältnissen lässt sich der Winkel im Masttop zur Want errechnen:

$$\tan(\alpha) = \text{Abstand zwischen Wantbefestigung und Mastfuß} / \text{Mastlänge}$$

$$\tan(\alpha) = B / H$$

$$\tan(\alpha) = 2,5 \text{ m} / 16 \text{ m}$$

$$\alpha = \underline{\underline{8,88 \text{ Grad}}}$$

Für die Zugkraft in der Want ( $F_{\text{(Want)}}$ ) gilt dann:

$$F_{\text{(Want)}} = F_{\text{(Masttop)}} / \sin(\alpha)$$

$$F_{\text{(Want)}} = 4.100 \text{ N} / \sin(8,88 \text{ Grad})$$

$$F_{\text{(Want)}} = \underline{\underline{26.560 \text{ N}}}$$

Für die Druckkräfte im Mast gilt:

$$F_{\text{(Mast)}} = F_{\text{(Want)}} * \cos(\alpha)$$

$$F_{\text{(Mast)}} = 26.560 * \cos(8,88)$$

$$F_{\text{(Mast)}} = \underline{\underline{26.242 \text{ N}}}$$

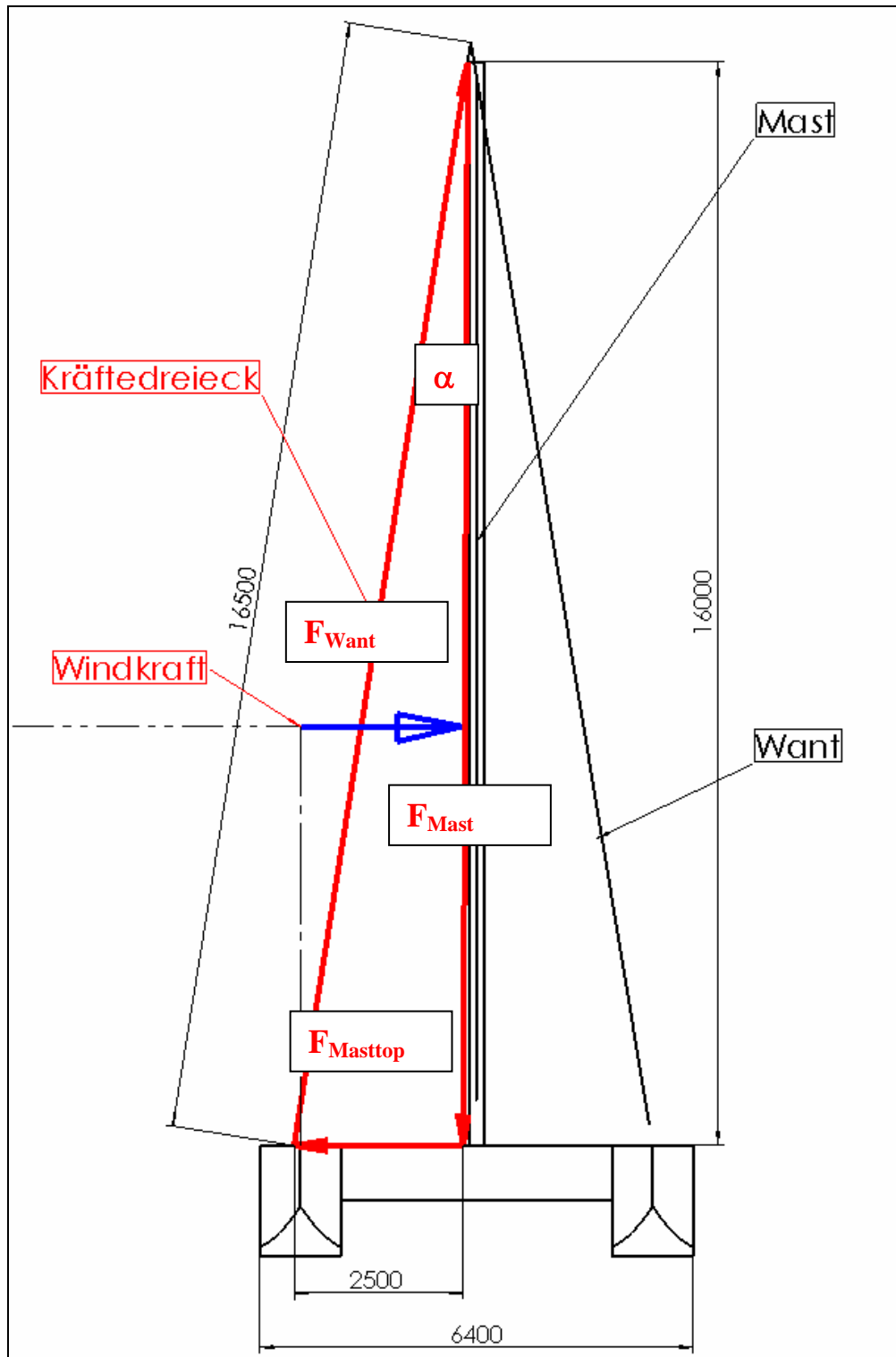


Abbildung 6-8: Darstellung der Kräfte

In einem weiteren Schritt muss ermittelt werden, wie groß das aufrichtende Moment des Katamarans bei einem Gewicht von 3.500 kg und einer Schiffsbreite von 6,4 m ist. (vgl. **Abbildung 6-9**). Wenn davon ausgegangen wird, dass sich die gesamte Crew auf der Luv-Seite befindet und die Masse des Schiffes ohne Crew ca. 3.000 kg beträgt, so ergibt sich als Ergebnis des aufrichtenden Momentes:

$$M_{\text{(Aufrichtend)}} = F_{\text{(Schiff)}} * L_{\text{(halbe Schiffsbreite)}} + F_{\text{(Crew)}} * L_{\text{(Schiffsbreite)}}$$

$$M_{\text{(Aufrichtend)}} = 30.000 \text{ N} * 3,2 \text{ m} + 4.800 \text{ N} * 6,4 \text{ m}$$

$$M_{\text{(Aufrichtend)}} = \underline{\underline{126.720 \text{ Nm}}}$$

Das aufrichtende Moment  $M_{\text{(Aufrichtend)}}$  ist somit etwa zweimal so groß wie das Moment am Mast  $M_{\text{(Mastfuß)}}$ . Da das Moment  $M_{\text{(Mastfuß)}}$  dem Moment  $M_{\text{(Aufrichtend)}}$  genau entgegen wirkt, ist sichergestellt, dass der Katamaran auch bei einem mittleren Winddruck der Windstärken 6 bis 7 (Anmerkung: der max. Winddruck kann bei Windstärke 7 fast  $180 \text{ N/m}^2$  erreichen, der hier berücksichtigte Winddruck beträgt aber „nur“  $130 \text{ N/m}^2$ ) selbst mit ungerefften Segeln nicht umkippt.

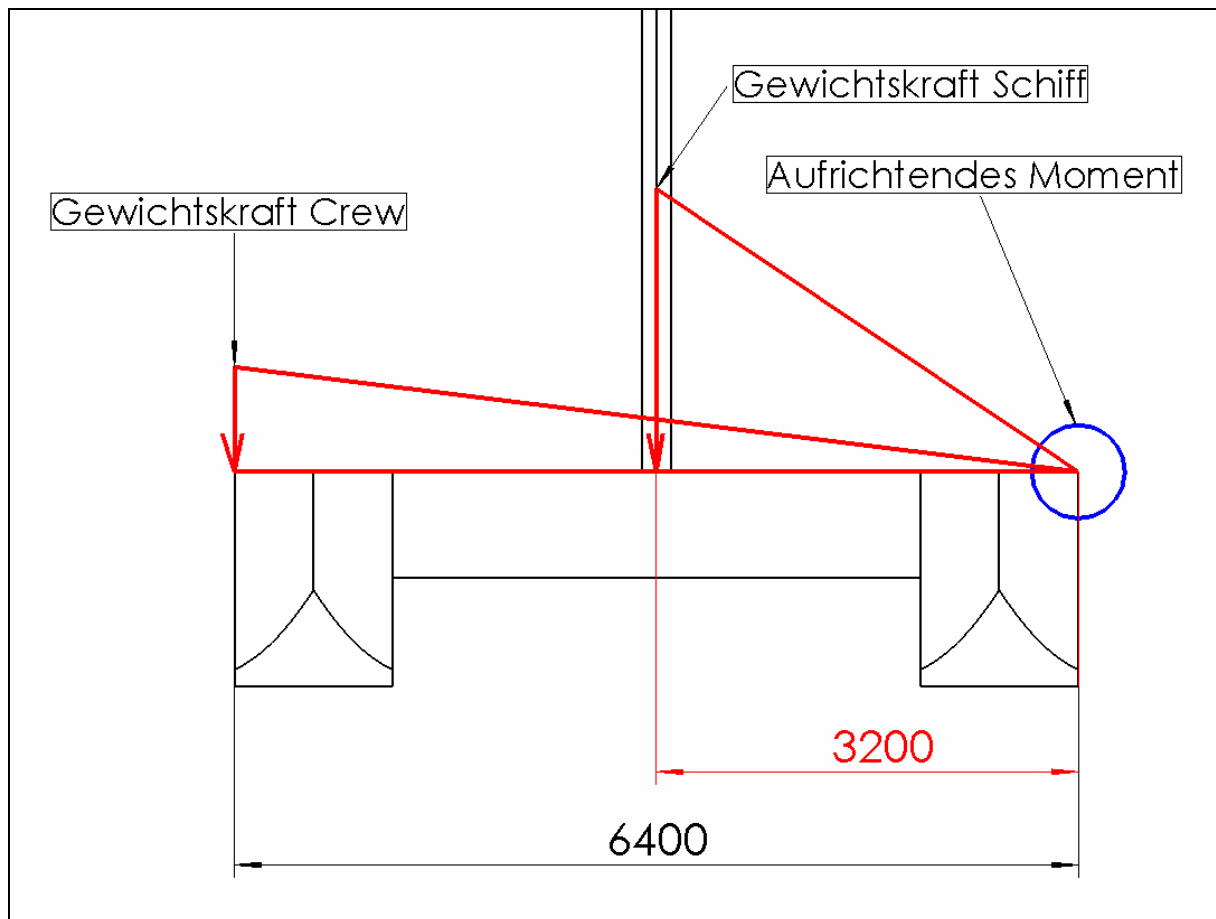


Abbildung 6-9: Darstellung vom Kraftdreieck durch Eigengewicht

Aus dem aufrichtenden Moment kann nun die maximale Kraft berechnet werden, die von „unten“ gegen den jeweiligen Lee-Schwimmer und damit gegen die beiden Lee-Gelenkarme

drückt. Die dieser aufrichtenden Kraft entgegenwirkende Kraft wirkt im Mastfuß nach unten, also in der Mitte des Schiffes:

$$F_{(\text{Rumpf})} = M_{(\text{Aufrichtend})} / L_{(\text{halbe Schiffsbreite})}$$

$$F_{(\text{Rumpf})} = 126.720 \text{ Nm} / 3,2 \text{ m}$$

$$\mathbf{F_{(Rumpf)} = \underline{\underline{39.600 \text{ N}}}}$$

Sicherlich wirken auf die beiden Rümpfe und damit auch auf die Gelenkarme weitere Kräfte, z.B. entstehen Kräfte durch den Wasserwiderstand, die entweder von vorne kommen oder / und durch die Abdrift bedingt, von der Seite kommen. Diese Kräfte sind jedoch nach einer überschlägigen Rechnung gegenüber den bisher berechneten Kräften so gering, dass diese auf die Auslegung der Gelenkarme keinen Einfluss haben. Somit werden beim Segeln im Grenzbereich immer alle 4 Gelenkarme auf Verbiegung nach oben belastet.

An den Luv-Gelenkarmen ziehen die Wanten mit einer Kraft von  $F_{(\text{want})} = 26.560 \text{ N}$  und an den Lee-Gelenkarmen entstehen durch das Gewicht des Schiffes und der Crew jeweils Kräfte von  $F_{(\text{Rumpf})} = 39.600 \text{ N}$ . Obwohl sich die Kräfte verteilen und dies gilt insbesondere für die Gewichtskräfte, die auf den vorderen und hinteren Gelenkarm wirken, so muss für eine sichere Auslegung aber davon ausgegangen werden, dass unter extremen Wind- und Wellenbedingungen die gesamte Last auf einen Gelenkarm wirkt. Um diesen wechselnden Belastungen und den daraus resultierenden Materialermüdungen gerecht zu werden und z.B. seltenes Auftreten plötzlicher Windböen u. ä. zu berücksichtigen, wird eine erhöhte Kraft von **50.000 N** verwendet. Somit ergibt sich als zusätzliche Sicherheit ein Faktor von **1,26**.

$$F_{(\text{Gelenkarm})} = F_{(\text{max})} * \text{Sicherheitsfaktor}$$

$$F_{(\text{Gelenkarm})} = 39.600 \text{ N} * 1,26$$

$$\mathbf{F_{(Gelenkarm)} = \underline{\underline{50.000 \text{ N}}}}$$

Neben der Ermittlung der Belastungen ist auch die Wahl der Werkstoffe ein äußerst wichtiges Kriterium für eine festigkeitsgerechte Gestaltung der einzelnen Komponenten. In Kapitel 6.1 wurden einige für den Schiffsbau einzusetzenden Werkstoffe vorgestellt. Für die nachfolgende konstruktive Gestaltung beschränkt sich die Auswahl aufgabenbedingt auf die beiden Rümpfe, den Deckaufbau und vor allem auf die hoch belasteten Verbindungsarme zu den Schwimmern und auf die Aufnahmen im Deckaufbau. Mit der Wahl des Gelenkarm-Werkstoffes kann die genaue Formgebung definiert, das Gewicht ermittelt und die

Möglichkeiten der Verarbeitung bestimmt werden. Für die Gestaltung der Gelenkarme wurde der Werkstoff: 5086 H 32 (Al Mg 5) gewählt (vgl. Kap. 6.1).

### **6.3 Konstruktive Gestaltung des Einzelteils „Gelenkarm“**

Ausgehend von der gefundenen Konstruktion gemäß der Abbildung 5-16 sind nun im Folgenden die Komponenten (Einzelteile) des Klappmechanismus zu detaillieren, die das Neue und Innovative dieser Arbeit ausmachen. Dieser Mechanismus besteht im Wesentlichen aus den 4 Gelenkarmen, die die Verbindung zwischen Mitteldeck und den beiden Schwimmern ausmachen. Des Weiteren müssen anschließend auch noch die Lagerung und die Aufnahme der Lager sowohl an den beiden Schwimmern als auch am Mitteldeck thematisiert werden. Die **Abbildung 6-10** zeigt die erste konstruktive Gestaltung eines Gelenkarmes (Gelenkarm\_1). Dieses Einzelteil wurde der Baugruppe (vgl. Abbildung 5-16) entnommen, die in dem Detailprozess Produktkonzeption als optimale Alternative ermittelt wurde. Neben dem Einzelteil Gelenkarm\_1 soll anschließend auch die Aufnahme der Gelenkarme detailliert konstruiert werden; dies aber erst nach der abschließenden Ermittlung der bestmöglichen Gelenkarmgeometrie.

Die endgültige Gelenkarmgeometrie kann allein mit konstruktiven Mitteln nicht erreicht werden, da die Gelenkarmgeometrie den äußeren Belastungen standhalten muss, muss der Gelenkarm jeweils durch eine Festigkeitsberechnung überprüft werden. Dies bedeutet, die konstruktive Gestaltung und die Nachprüfung der Festigkeit ist nicht losgelöst voneinander durchzuführen. Deshalb müssen auch zwei Softwareprodukte benutzt werden, die einen reibungslosen Datenaustausch ermöglichen. Für die Ermittlung einer optimalen Gelenkarmgeometrie ist zunächst das vorhandene reale 3D-Modell geladen, welches die Grundlage für die Berechnung der Festigkeit mit Hilfe von FEM darstellt. Die jeweilige Berechnung wird zeigen, ob die momentan aktuelle Gelenkarmgeometrie den tatsächlich auftretenden Belastungen standhält oder an welchen Stellen eine Optimierung erforderlich ist. Wenn eine Optimierung notwendig ist, kann diese unmittelbar an dem 3D-Modell durchgeführt werden und die FEM Berechnung beginnt von neuem. Diese Iteration läuft so lange ab, bis eine in jeder Hinsicht korrekte Gelenkarmgeometrie gefunden ist. In der Folge werden zunächst die Berechnungsgrundlagen definiert, welche der FEM-Berechnung zu Grunde liegen.

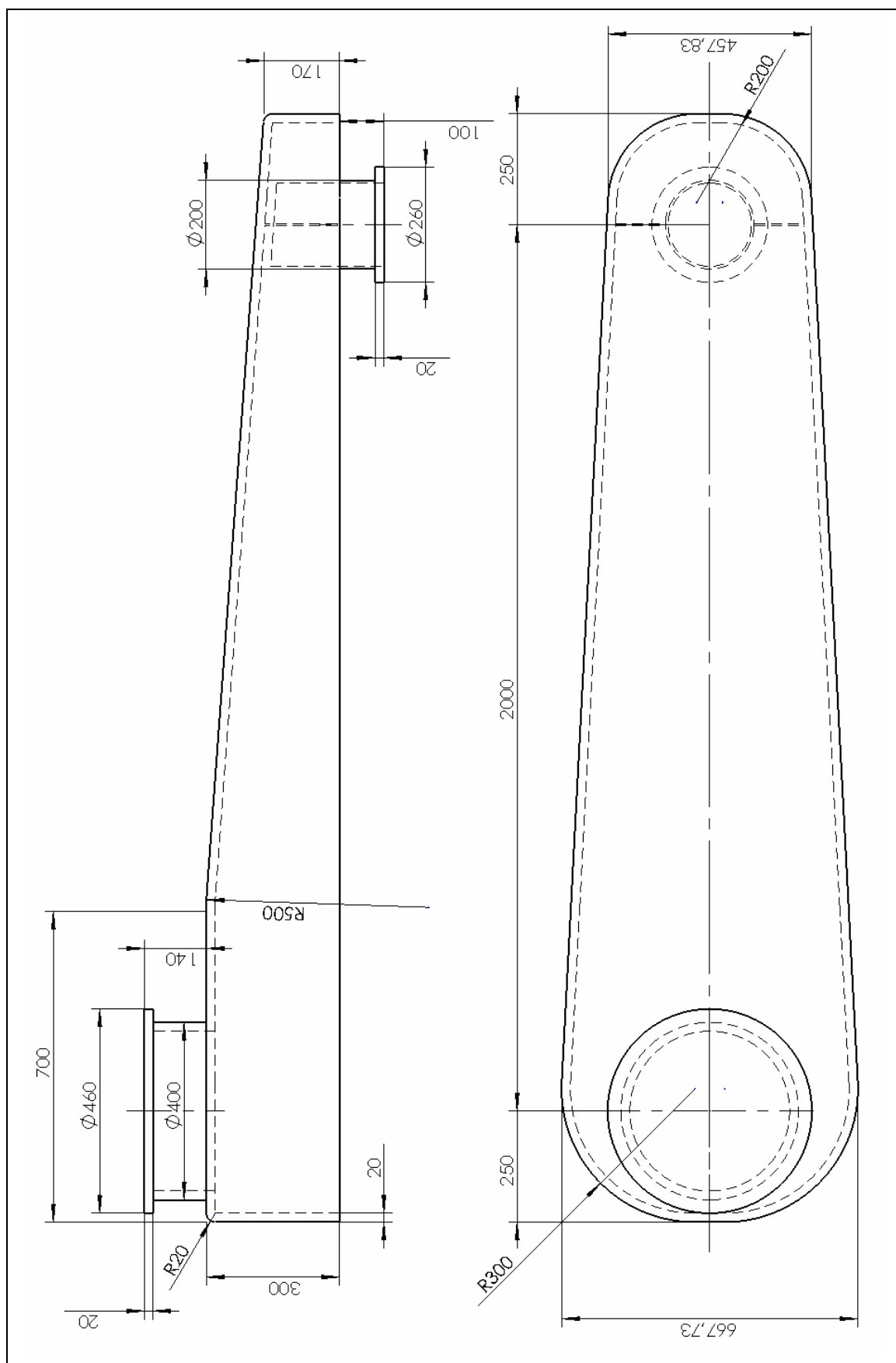


Abbildung 6-10: Ausgangssituation des Gelenkarm\_1



#### 6.4 Iterative Ermittlung der endgültigen Gelenkarmgeometrie

Für die FEM-Berechnungen müssen neben dem Werkstoff auch die Kräfte bekannt sein, die auf den Gelenkarm wirken. Diese ergeben sich aus den Zugkräften der Wanten, die den Mast halten, aus dem Eigengewicht und den durch die Wellen entstehenden wechselnden Belastungen. Wie in Kapitel 6.2 dargestellt, wird von einer maximalen Beanspruchung von **50.000 N** pro Gelenkarm ausgegangen.

Für die FEM-Berechnung wird gemäß Kap. 3.4 das Softwareprodukt COSMOS eingesetzt. Zunächst wird das exakte 3D-CAD-Modell unmittelbar aus dem CAD-System SolidWorks eingelesen, bevor die jeweiligen Randbedingungen bestimmt werden. Als erstes wird die Materialauswahl gemäß der **Abbildung 6-11** vorgenommen, indem ein Werkstoff aus einer hinterlegten Datenbank ausgewählt bzw. der Werkstoff und dessen Kennwerte individuell festgelegt wird. Die in SolidWorks hinterlegte Datenbank orientiert sich nicht an der DIN, sondern an den amerikanischen Gegebenheiten. Deshalb wurde ein Werkstoff in SolidWorks ausgewählt, der dem gewünschten Werkstoff 5086 H 32 (**Al Mg 5**) sehr nahe kommt, nur die Streckgrenze und Zugfestigkeit wurden gemäß der Abbildung 6-4 angepasst.

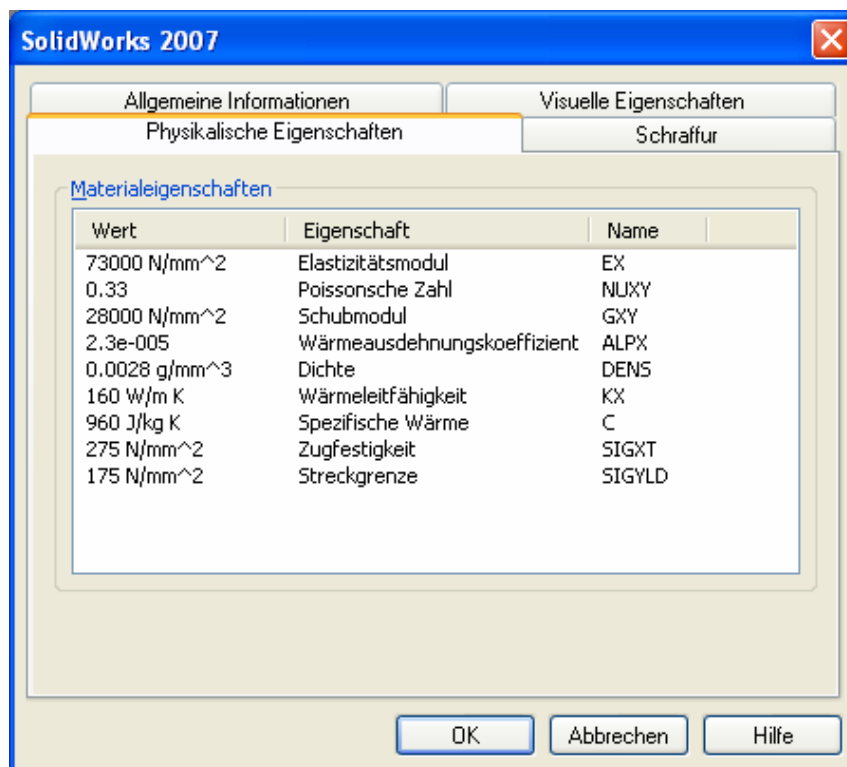


Abbildung 6-11: Auswahl und Eigenschaften des Materials Al Mg 5

Hinweis: Die Anpassung der Streckgrenze von  $185 \text{ N/mm}^2$  auf  $175 \text{ N/mm}^2$  eine zusätzliche Sicherheit von ca. 5%:

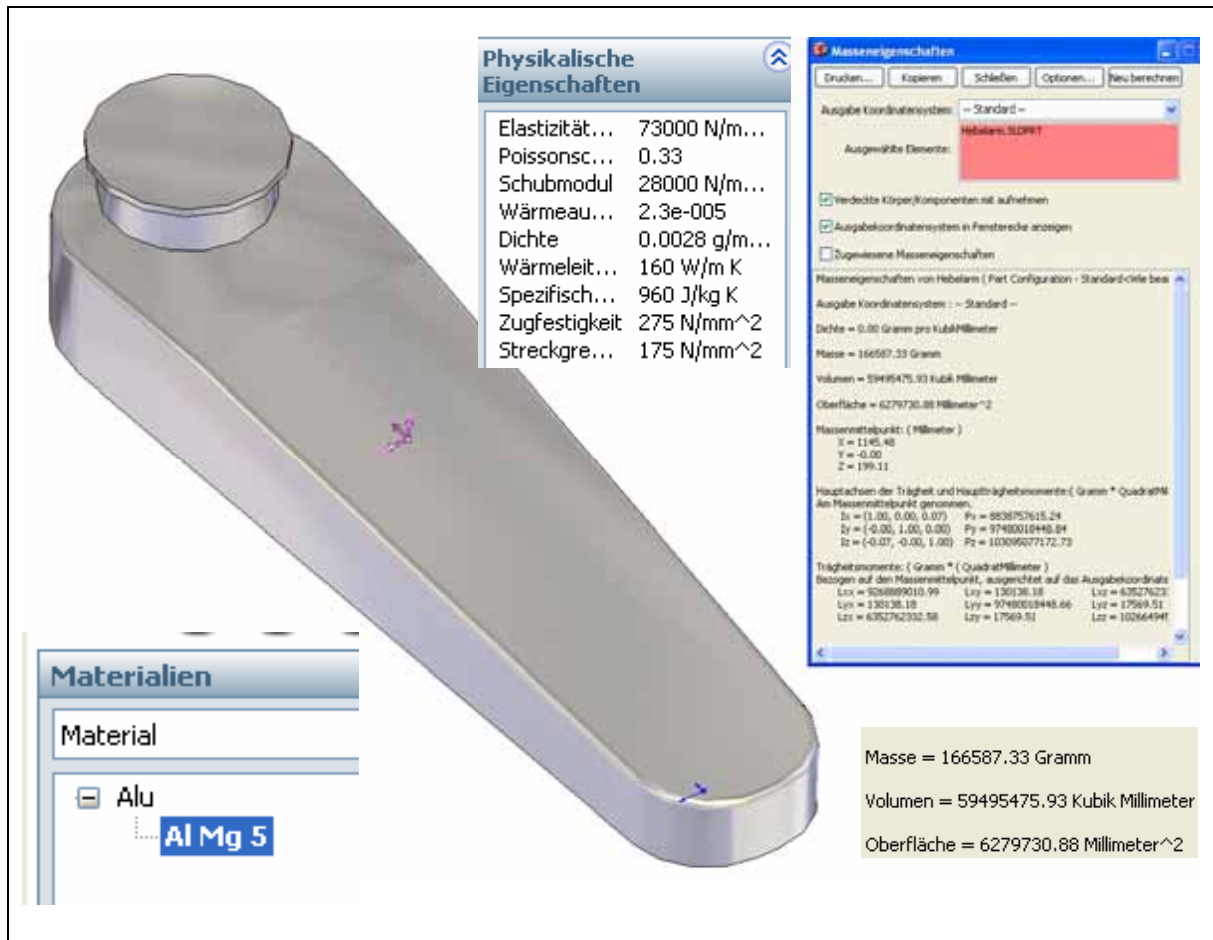


Abbildung 6-12: Darstellung des Bauteils Gelenkarm\_1 mit Werkstoffkennwerten

Die **Abbildung 6-12** zeigt das eingelese 3D-CAD-Modell, welches der 2D-Darstellung in der Abbildung 6-10 entspricht. Darüber hinaus enthält die Darstellung die definierten Werkstoffkennwerte und sie gibt weitere Auskunft über die Masse, das Volumen, die Oberfläche, den Massenmittelpunkt und die Trägheitsmomente dieses Modells. Für die Optimierung des Gelenkarmes interessiert von diesen Werten nur die Masse = **166 kg**. Im weiteren Verlauf wird deshalb auf die komplette Ausgabe der Masseneigenschaften verzichtet. Obwohl die Masse ca. 66% höher ist, als die angenommene Masse von 100 kg, wird für eine Orientierung der nachfolgenden Optimierungen der Gelenkarm bezüglich seines Sicherheitsfaktors und seiner Festigkeit analysiert.

Nach der Materialauswahl werden die Lagerungen und die angreifenden Kräfte definiert. Zur Festlegung der Angriffsstellen können Flächen, Linien und Punkte angewählt werden, welche sofort durch farbige Pfeile angezeigt werden. Gleichzeitig kann auch die Richtung und Größe der Kraft und die Anzahl der Kräfte beliebig definiert werden. Die **Abbildung 6-13** zeigt das Menü von COSMOS für die Eingabe der Randbedingungen, wie „Material“, „Lager“ und „Last“ und für die auszuführenden Berechnungen, wie „Analysieren“ und „Optimieren“

sowie für die Ausgabe der „Ergebnisse“. In dem darunter positionierten Dialogfeld wird der Benutzer in Abhängigkeit der von ihm gewünschten Eingabe interaktiv geführt. Im weiteren Verlauf wird in den Darstellungen der Ein- / Ausgaben nur noch der Inhalt des Dialogfeldes vergrößert eingeblendet.

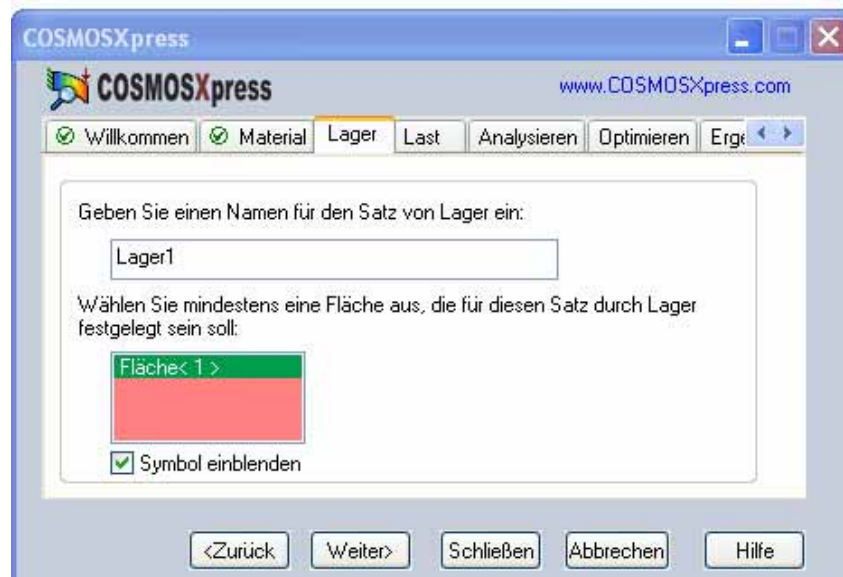


Abbildung 6-13: Dialog mit COSMOS

In der Abbildung 6-13 wird die Lagerung für das CAD-Modell definiert. Nach der Eingabe des Namens für das Lager („Lager1“) wird der Benutzer aufgefordert, durch das identifizieren einer „Körperfläche“ am 3D-Modell den Ort der Lagerung zu bestimmen

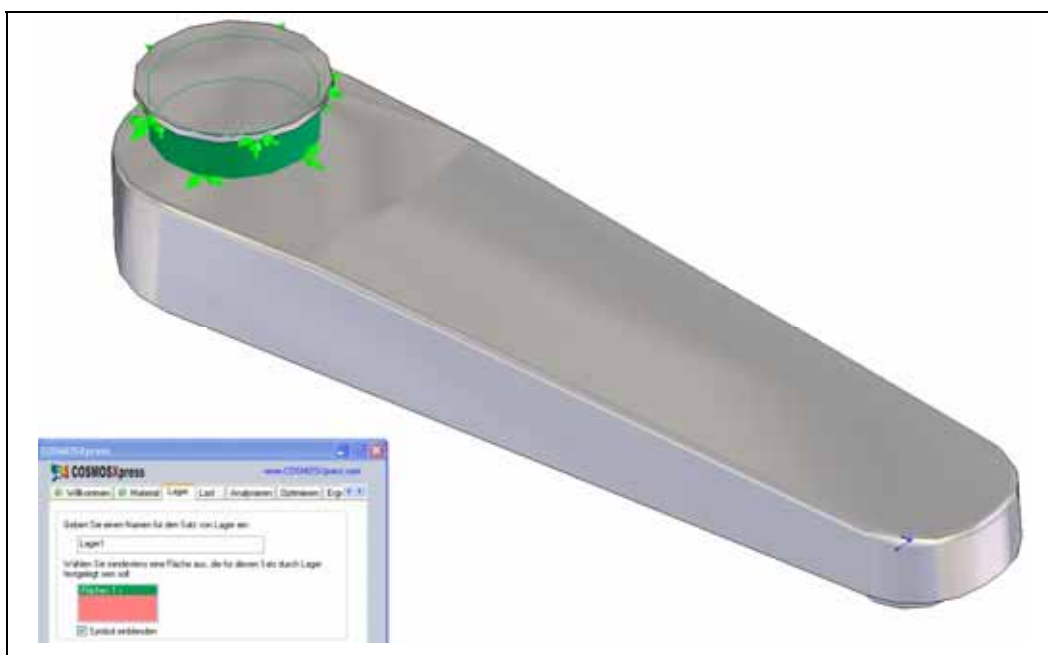


Abbildung 6-14: Eingabe der Lagerung für Gelenkarm\_1

In der **Abbildung 6-14** wird der gewählte Ort der Lagerung durch die Anzeige der grünen Pfeile dem Benutzer zur Überprüfung angezeigt. In diesem Fall werden an der ausgewählten Fläche alle Verschiebungen (in x-, y- und z-Richtung) verhindert. Nachfolgend muss auf die gleiche Art und Weise die Belastung eingegeben werden. Im Gegensatz zu der Lagerung wird hier eine **ebene Fläche** ausgewählt, auf die eine **Kraft** von **50.000 N senkrecht** („normal“) wirkt. Als Ausgabe wird sowohl die „Ebene“ (grün) als auch die angreifende Kraft (rote Pfeile) angezeigt (vgl. **Abbildung 6-15**).

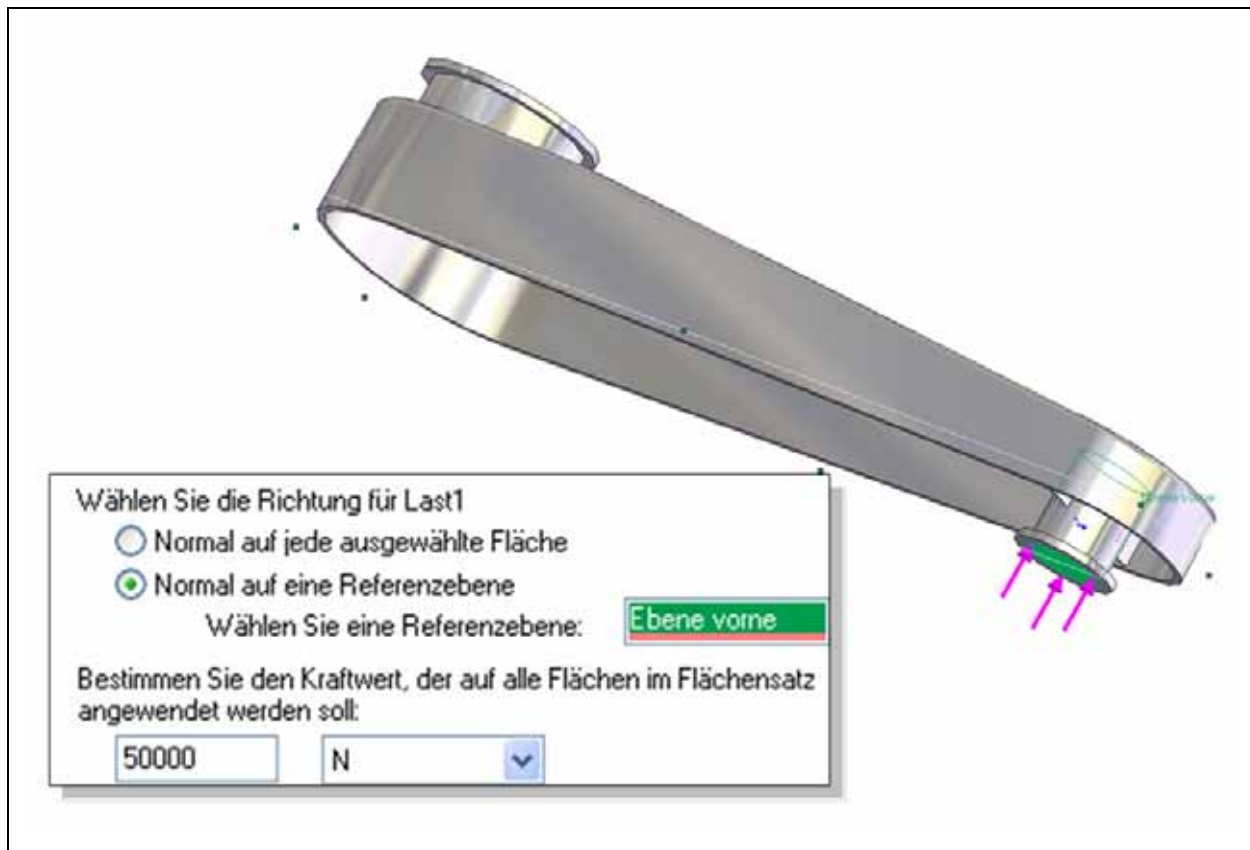


Abbildung 6-15: Grafische Darstellung der Spannungsverläufe für Gelenkarm\_1

Nach der Definition der Werkstoffkennwerte, der Lagerung und der Belastung werden in einem nächsten Schritt die Vernetzung und anschließend die Berechnung des Bauteiles durch COSMOS vorgenommen. Die FEM-Berechnung beschränkt sich auf den linear-elastischen Bereich, in dem keine bleibende Verformung eintritt, bleibt also im Bereich der Hookeschen Gerade. Anhand der Feinheit bzw. Grobheit des Netzes kann festgestellt werden, ob sich die Spannungskonzentrationen nur auf einzelne Elemente oder auf ganze (Element-)Bereiche bezieht. Im ersten Fall (einzelne Elemente) könnten so genannte Singularitäten (z.B. scharfkantige Modellierung) eine Rolle spielen und dann bildet die Höhe der Spannung nicht die Realität ab.

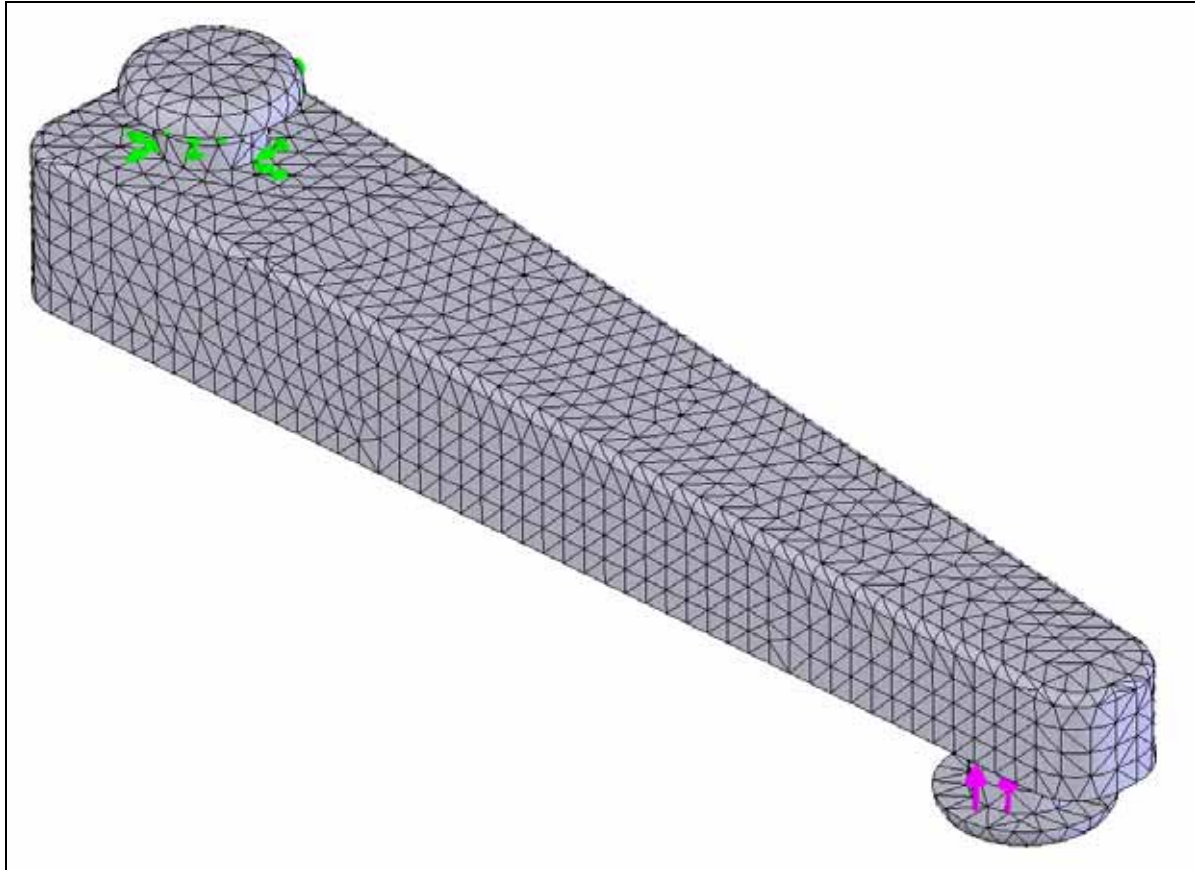


Abbildung 6-16: FE-Vernetzung Gelenkarm\_1

Für eine erste Aussage ist das Ergebnis des erreichten Sicherheitsfaktors in Bezug zur Streckgrenze relevant (vgl. **Abbildung 6-17**). Liegt dieser Wert unter 1, so ist davon auszugehen, dass das Bauteil den Belastungen nicht standhalten wird. Da der minimale Sicherheitsfaktor von **0,405** deutlich unter der geforderten Beanspruchung liegt, ist vor einer weiteren Detaillierung eine konstruktive Änderung des Gelenkarmes erforderlich.

Neben der zu hohen Masse von 166 kg pro Gelenkarm (vgl. Abbildung 6-12) ist auch der zu niedrige Sicherheitswert völlig ungeeignet und erfordert ebenfalls eine Änderung der Konstruktion des Gelenkarmes. Die Darstellung der Spannungsverteilung (vgl. **Abbildung 6-18**) gibt Aufschluss darüber, auf welche Stellen bei einer Anpassungs- oder Neukonstruktion hinsichtlich der Verstärkungen und einer größer dimensionierten Auslegung besonders zu achten ist. Die Darstellung zeigt, dass die Aufnahme des Gelenkarmes am Mitteldeck (in Abbildung 6-14 als Lager gekennzeichnet) genauer zu betrachten und gegebenenfalls größer zu dimensionieren ist.

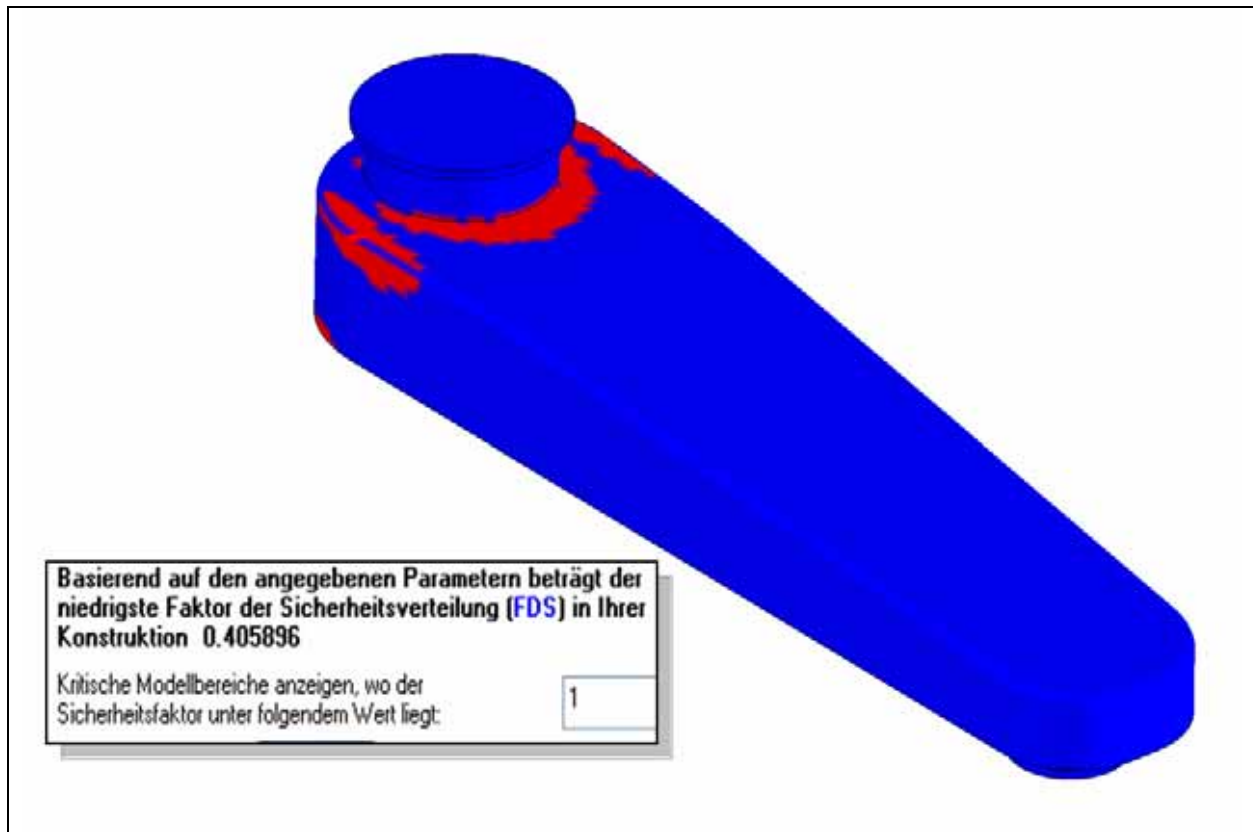


Abbildung 6-17: Sicherheitsfaktor des Gelenkarm\_1

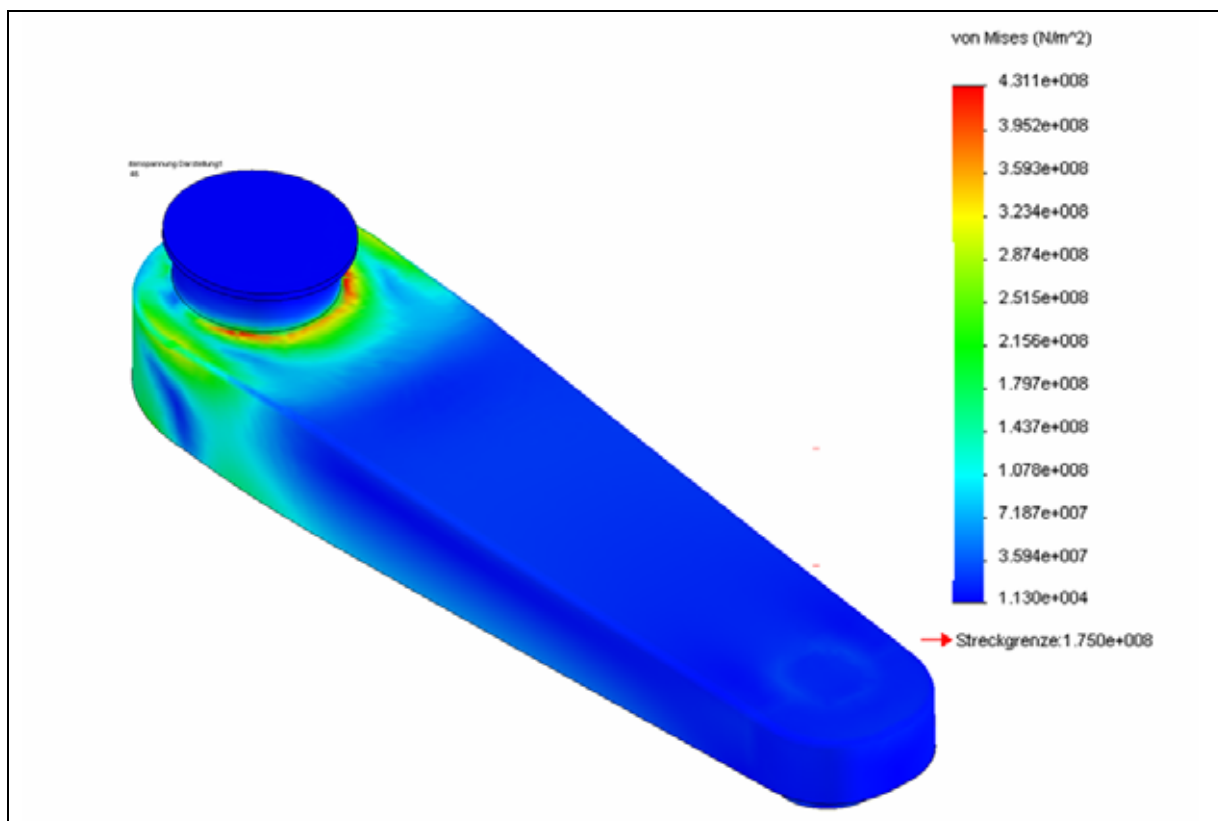


Abbildung 6-18: Spannungsverteilung des Gelenkarm\_1

Des Weiteren unterliegt der Gelenkarm einer Biegebelastung. Eine Änderung der Biegesteifigkeit, hier eine Erhöhung, muss durch konstruktive Maßnahmen herbeigeführt werden. Für die dafür notwendige Optimierung des Gelenkarmes werden die beiden Kriterien „Gewicht“ und „Sicherheitsfaktor“ den Anforderungen gemäß durch aufeinander folgende konstruktive Änderungen beeinflusst und verbessert. Zunächst wird durch eine Einsparung von Material das Gewicht weiter reduziert und durch eine Änderung der Geometrie die Steifigkeit des Gelenkarms verbessert und damit hoffentlich auch der errechnete Sicherheitsfaktor weiter erhöht.

Erst wenn durch die Variation das Verhältnis von Geometrie zu Gewicht und Festigkeit ein Optimum erreicht hat, werden weitere Überlegungen bezüglich einer eventuell neuen Materialauswahl vorgenommen. Unabhängig von einer anderen Materialauswahl können aber noch weitere stabilisierende Möglichkeiten wie z.B. die Verstärkung durch Stahlwangen in Betracht gezogen werden. So wird zunächst in einer 1. Optimierung durch eine Verringerung der Wandstärken auf 10 mm und das Einsetzen einer Verstrebung in der Mitte (vgl. **Abbildung 6-19**) eine Masse von **114 kg** und damit eine erhebliche Materialeinsparung von fast 35 % erreicht.

Die minimale Sicherheitsfaktor Verteilung der auftretenden Spannungen ist gemäß der Abbildung 6-20 gleichmäßiger, der Maximalwert hat sich jedoch leicht verbessert gegenüber der Darstellung in der Abbildung 6-18. Daher ist bei dem Sicherheitsfaktor keine signifikante Verbesserung zu bemerken. (*Hinweis: Der minimale Sicherheitsfaktor kann sich nur um denselben Faktor verbessern, wie die maximale Spannung.*) Der niedrigste Faktor für die Sicherheitsverteilung liegt bei **0,42** (vgl. Abbildung 6-17 mit der Abbildung 6-20). In der Abbildung 6-20 ist die Sicherheitsverteilung dargestellt. Damit die Darstellung auch für das betrachtende Auge deutlicher sichtbar wird, wurde der kritische Modellbereich mit dem Wert 2 vorgegeben, obwohl ein Wert von 1 ausreichen würde.



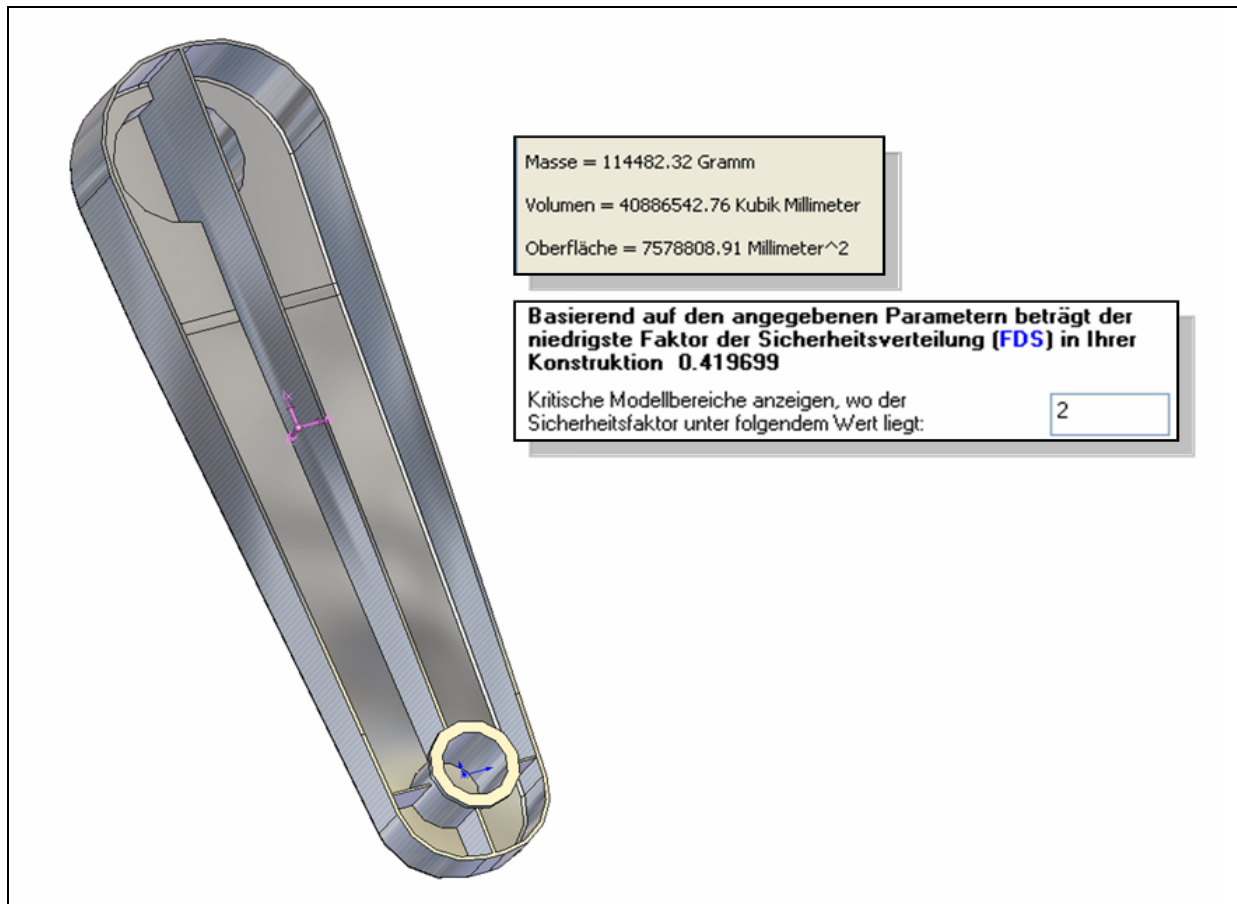


Abbildung 6-19: Einbringen eines Mittelstegs in Gelenkarm\_1 (1. Optimierung)

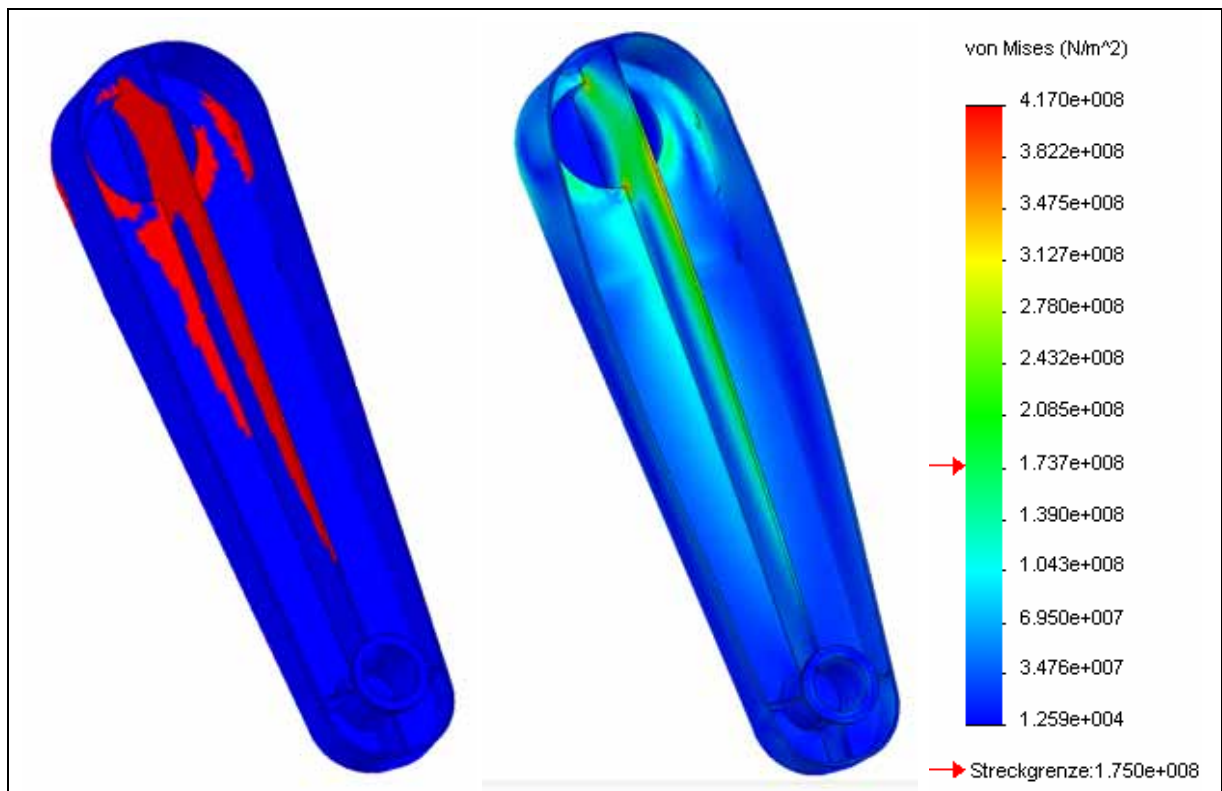


Abbildung 6-20: Sicherheitsfaktor und Festigkeit für den Gelenkarm\_1 (1. Optimierung)



Auch bei einer weiteren Optimierung der Geometrie innerhalb der möglichen Grenzen ist für den Sicherheitsfaktor kaum mit einer Vergrößerung um das 2 1/2-fache zu rechnen. Daher wird in einem nächsten Schritt eine weitere Bauteiloptimierung vorgenommen, indem nun die geringere Materialdicke mit 3 Verstrebungen an der Aufnahme (vgl. **Abbildung 6-21**), also an den Angriffspunkten der Kräfte, kombiniert wird. Durch das dünner werdende Material bei gleichen Außenabmessungen muss eine deutlich feinere Vernetzung gewählt werden, was dann zu erheblich längeren Rechenzeiten führt.

Diese Geometrieränderung führt zwar zu besseren Festigkeitswerten (vgl. **Abbildung 6-22**), aber der Sicherheitsfaktor hat sich mit einem Wert von **0,427** nicht verbessert, so dass eine Massereduzierung durch eine Verringerung der Wandstärke nicht weiter in Betracht gezogen wird. Des Weiteren würde eine Verfeinerung der Geometrie durch weitere Rippen zwar die Stabilität verbessern, jedoch die Fertigung wesentlich erschweren bis unmöglich gestalten und daher auch die damit verbundenen Kosten wesentlich erhöhen. Damit ist die momentane Konstruktion für weitere Optimierungen (Anpassungskonstruktion) nicht mehr geeignet, so dass ein völliger Neuaufbau der Konstruktion (Neukonstruktion) in Angriff genommen werden muss.

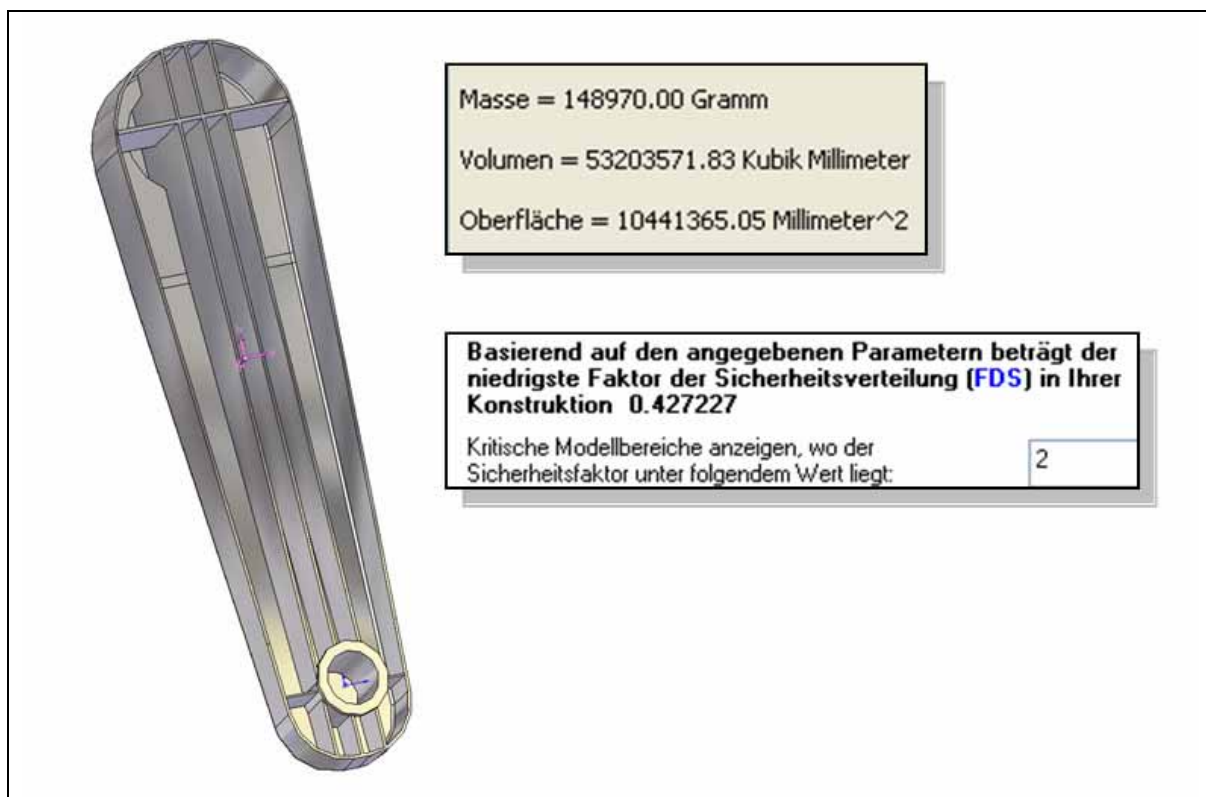


Abbildung 6-21: Einbringen von 3 Stegen in Gelenkarm\_1 (2. Optimierung)

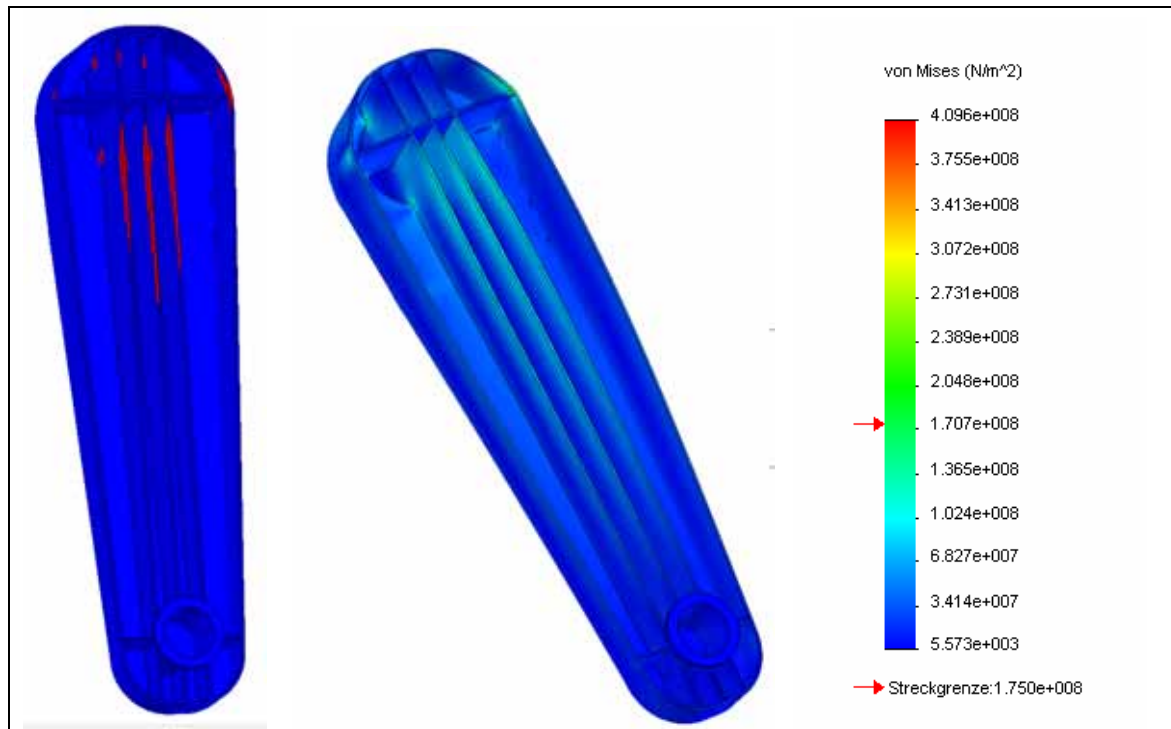


Abbildung 6-22: Sicherheitsfaktor und Festigkeit für den Gelenkarm\_1 (2. Optimierung)

Ausgehend von den Kenntnissen im Stahlbau wird deshalb für diese Art der Beanspruchung ein weiteres konstruktives Konzept, die IPE-Bauweise als Doppel-T-Träger, gemäß der **Abbildung 6-23** in Betracht gezogen. Die Erkenntnisse des Stahlbaus werden nur für die geometrische Gestaltung genutzt, der Werkstoff hingegen ist nach wie vor Aluminium. Im Ergebnis führt dies dann zu einer neuen konstruktiven Gestaltung und damit auch zu einem neuen 3D-CAD-Modell des Gelenkarmes, dessen 2D-Ableitung in **Abbildung 6-24** dargestellt ist. Dieses Modell wird nun für die weiteren Ermittlungen des Sicherheitsfaktors und der Spannungsverteilungen eingesetzt.

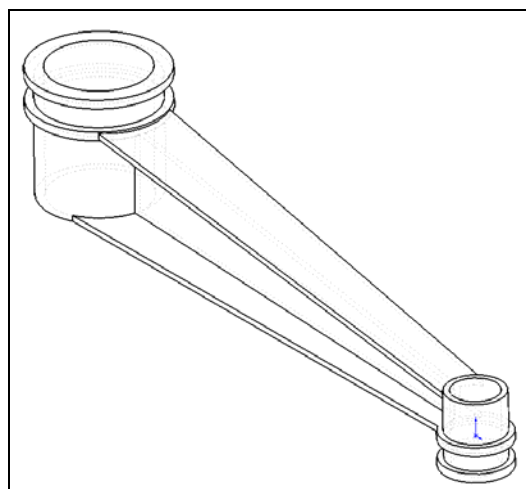


Abbildung 6-23: Gelenkarm, konstruiert in IPE Bauweise (3. Optimierung)

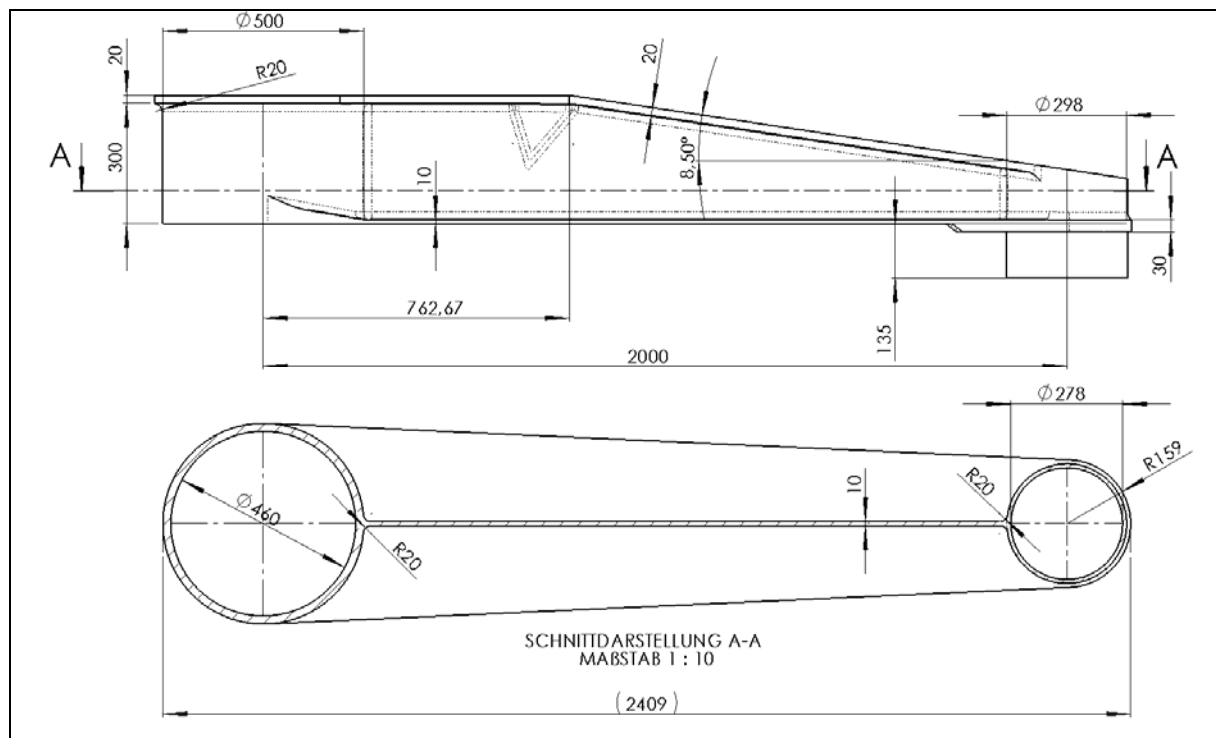


Abbildung 6-24: Konstruktion des Gelenkarm\_2 (3. Optimierung)

Durch die neue Konstruktion konnte der Materialaufwand gegenüber der Ausgangssituation von 166 kg (vgl. Abbildung 6-12) auf eine Masse von **105 kg** verringert werden (vgl. **Abbildung 6-25**) und gleichzeitig wurde für den niedrigsten Sicherheitsfaktor ein Wert von **2,73** (vgl. Abbildung 6-25 und **Abbildung 6-26**) erreicht. Das Ergebnis der Abbildung zeigt die Orte, an denen der Sicherheitsfaktor unter 4 liegt. Neben dem größeren Sicherheitsfaktor zeigt die Darstellung der Spannungs-Verteilung (vgl. **Abbildung 6-27**), dass insbesondere mit einer Optimierung in den Zug- und Druckaufnahmebereichen des Mitteldecks problemlos weitere Verbesserungen erzielt werden können. Somit wird dieses Konstruktionskonzept als Basis für alle weiteren Optimierungen der Konstruktion und den damit einhergehenden Berechnungen zu Grunde gelegt.

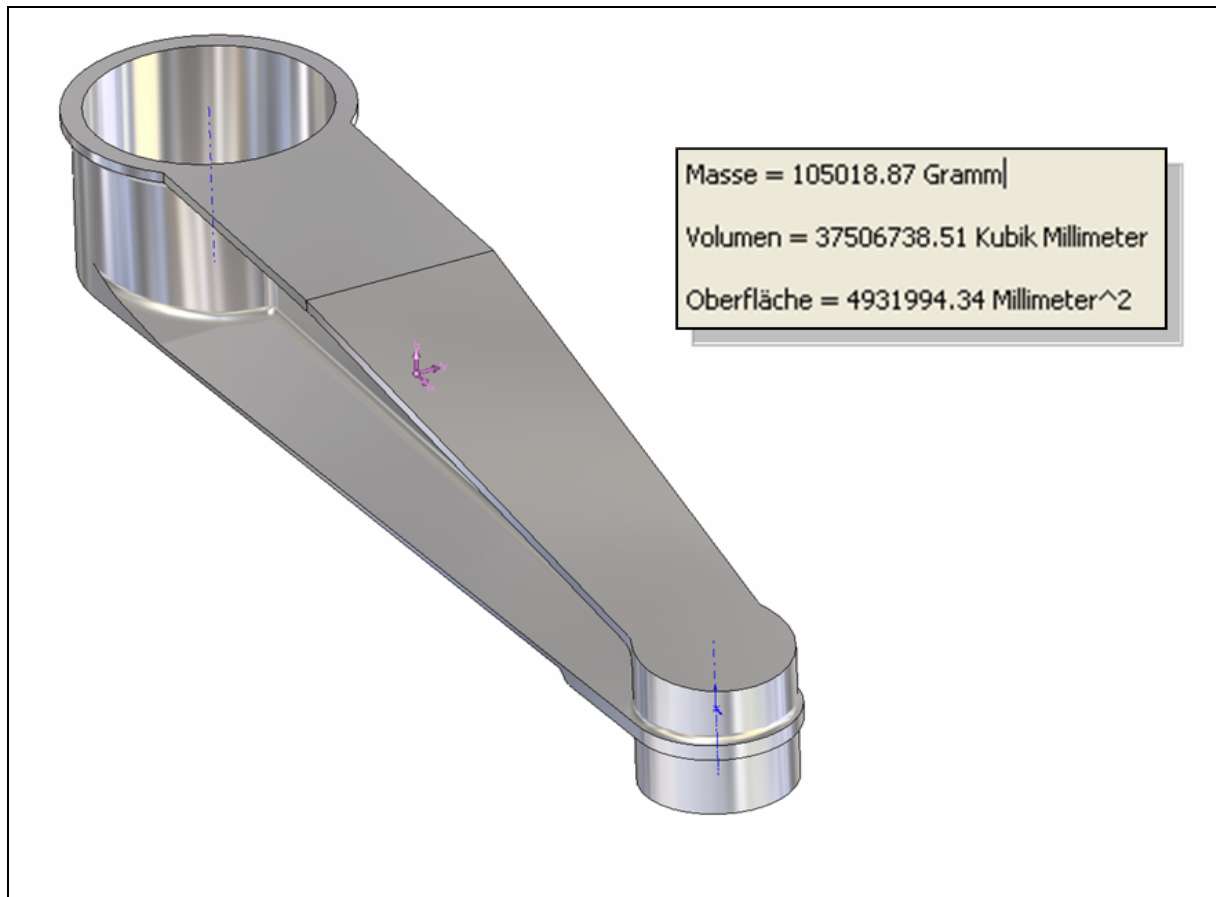


Abbildung 6-25: Gelenkarm\_2 (3. Optimierung)

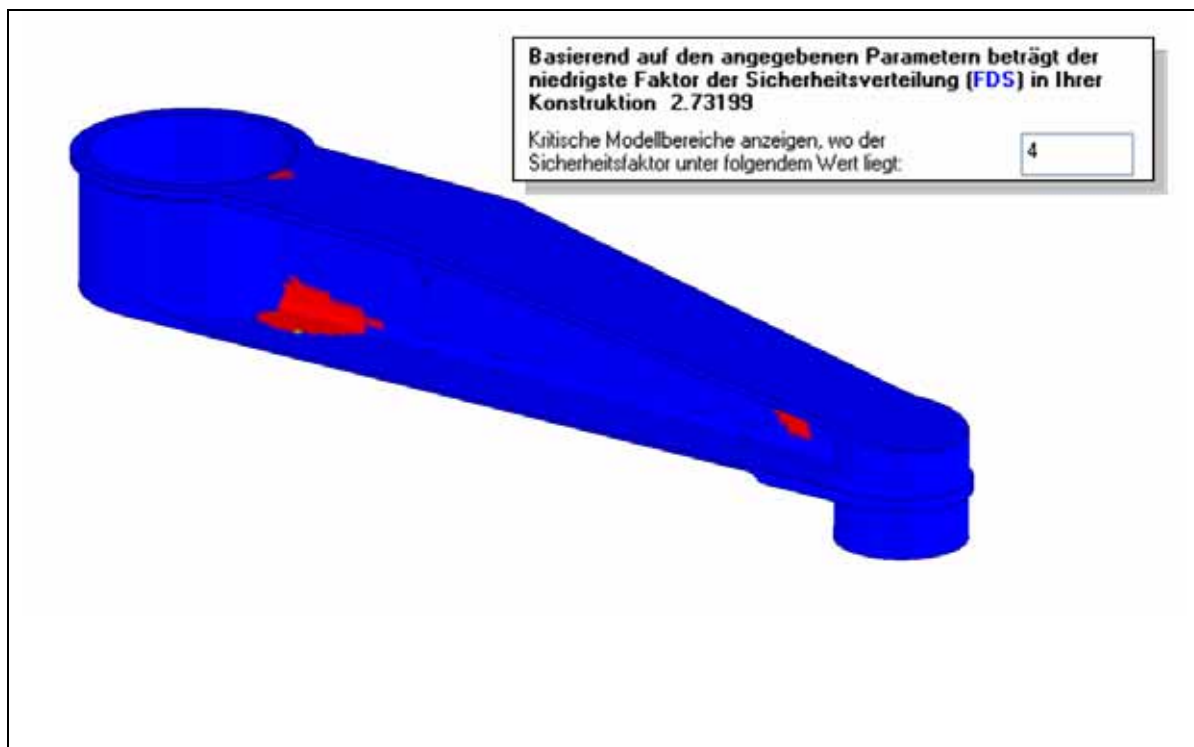


Abbildung 6-26: Sicherheitsfaktor des Gelenkarm\_2 (3. Optimierung)

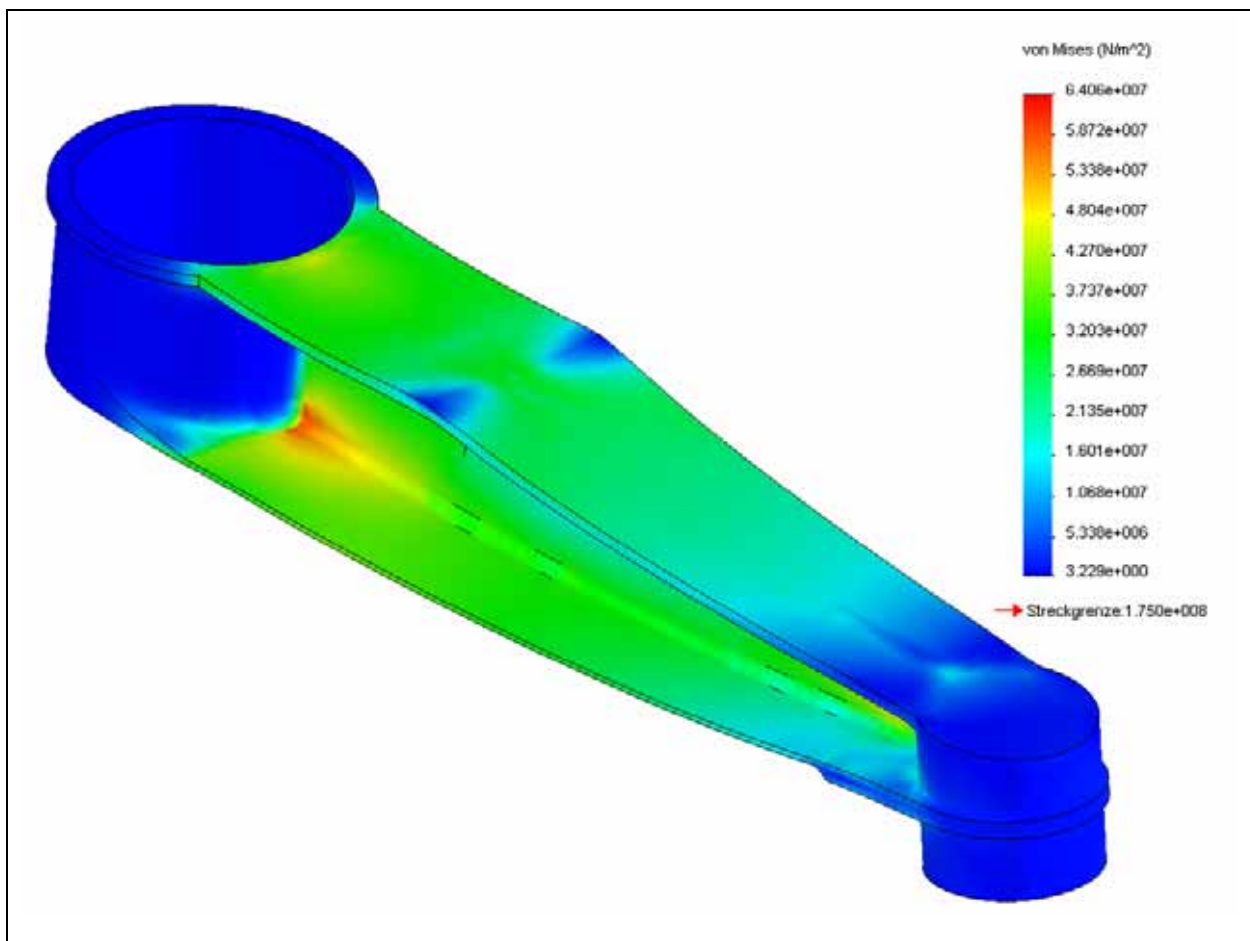


Abbildung 6-27: Spannungsverteilung des Gelenkarm\_2 (3. Optimierung)

Darüber hinaus wird durch die Spannungsverteilung gemäß der Abbildung 6-27 gezeigt, dass die Konstruktion in allen Bereichen den Festigkeitsanforderungen gerecht wird und den Beanspruchungen in jeder Hinsicht standhält. Ein derartig optimales Ergebnis ist ohne den Einsatz von moderner 3D-CAD- und FEM-Software kaum möglich. Nach mehreren Optimierungen bezogen auf die Festigkeit und die Gestalt des Bauteiles „Gelenkarm“, so z.B. die Aufnahmen der Gelenkarme am Mitteldeck und an den Schwimmern, ist die konstruktive Gestaltung des Gelenkarmes in einer ersten Konstruktionsphase abgeschlossen. Das Ergebnis als Fertigungszeichnung zeigt die Abbildung 6-24. Die durch die Optimierung vorgenommenen Veränderungen werden durch den Vergleich mit der Ausgangssituation gemäß der Abbildung 6-10 deutlich.

Nachdem nun die Geometrie-Definition der Gelenkarme einschließlich der dazu gehörenden Festigkeitsberechnungen abgeschlossen ist, sollen diese nun in den Katamaran gemäß der **Abbildung 6-28** integriert werden, damit auch die Aufnahmen der Gelenkarme an das Mitteldeck und die Schwimmer daran angepasst werden können.

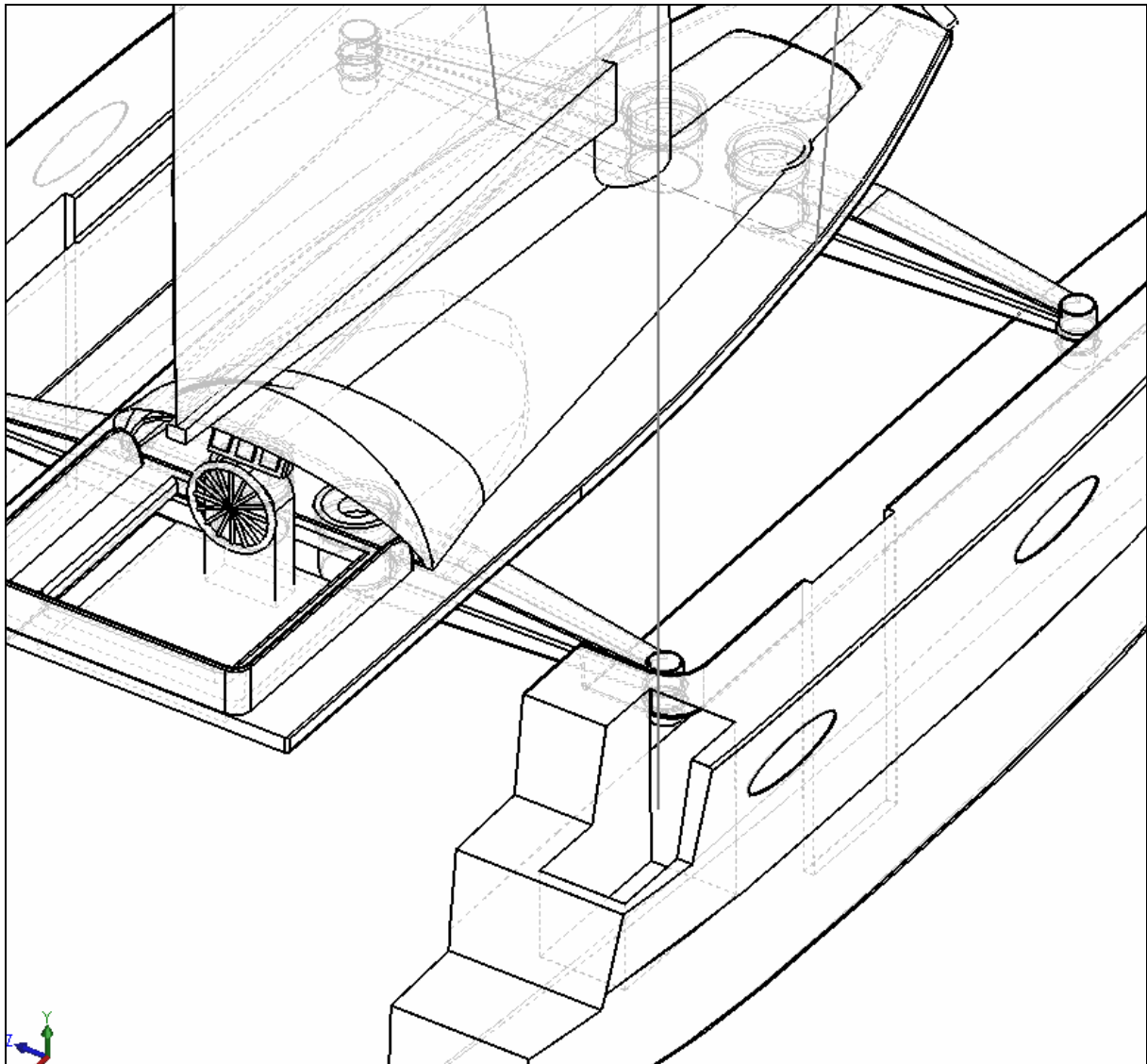


Abbildung 6-28: Katamaran mit den neuen Gelenkarmen (Gelenkarm\_2)

### 6.5 Überprüfung der FEM-Ergebnisse an einem Ersatz-Modell

Zum Nachweis der Plausibilität der durch die FEM-Berechnung ermittelten Ergebnisse wird ein stark vereinfachtes Ersatz-Modell definiert, welches mit den konventionellen Berechnungsmethoden nachgerechnet werden kann, damit die hier erzielten Ergebnisse mit denen der FEM-Berechnung verglichen werden können. Der dafür erforderliche Nachweis wird mit einem Berechnungstool geführt, welches in der Standardversion des CAD-Systems SolidWorks enthalten ist. Um die Funktionalität dieses Softwaretools zu nutzen, muss entweder eine entsprechende 3D-Geometrie des Ersatz-Modells generiert werden, oder

wenn möglich, kann auf bereits im System vorgegebene Standardgeometrien zurückgegriffen werden.

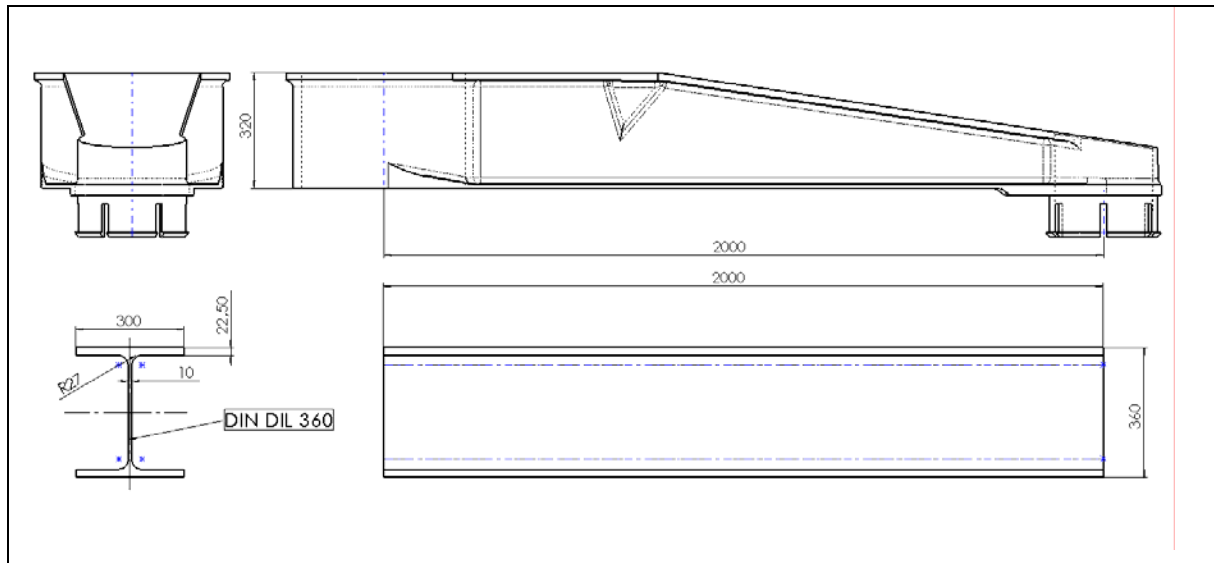


Abbildung 6-29: Gelenkarm\_2 und Ersatzmodell Doppel-T-Träger DIN DIL 360

Im Vergleich mit der endgültigen Gelenkarm-Konstruktion (vgl. obere Hälfte in der Abbildung 6-29 mit der Abbildung 6-24) ist als Ersatz-Modell (untere Hälfte in der Abbildung 6-29) die Wahl eines Doppel-T-Trägers sehr nahe liegend. Die Datenbank des CAD-Systems SolidWorks bietet in diesem Zusammenhang Doppel-T-Träger für den Stahlbau an. Die maximale Höhe des Gelenkarmes der fertigen Konstruktion beträgt 320 mm. Der nächste genormte Doppel-T-Träger gemäß der DIN DIL (SolidWorks spezifisch) hat eine Höhe von 340 mm (vgl. **Abbildung 6-30**). Da aber ein DIL-Träger dieser Größe neben einer geringeren Breite und durch fehlende zusätzliche Versteifungen auch eine geringere Biegefestigkeit aufweist, wird für das Ersatz-Modell die nächste größere Variante mit einer Höhe von 360 mm gewählt. Der Abstand für die beiden Lager der Gelenkarme wird gemäß der Original-Konstruktion mit 2.000 mm dimensioniert (vgl. Abbildung 6-29).

Für das Ersatz-Modell wird als Werkstoff exakt dieselbe Aluminium-Legierung gewählt. Für die Belastung werden die gleichen Kräfteverhältnisse angenommen, auf der einen Seite wird eine feste Einspannung definiert und auf der anderen Seite wird eine vertikale Kraft von **50.000 N** eingeleitet.



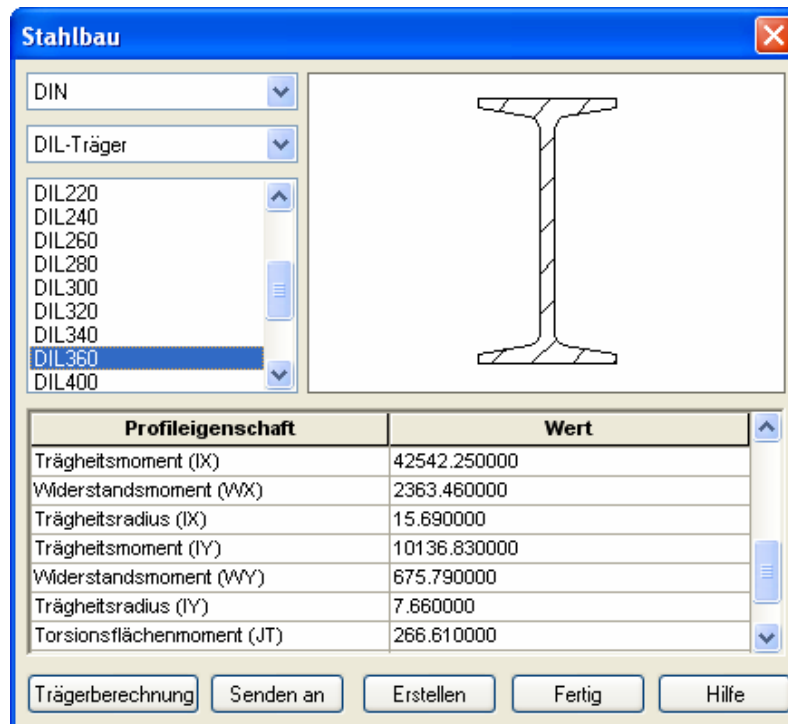


Abbildung 6-30: Werte für einen Doppel-T-Träger DIL 360

Zunächst wird das Ersatz-Modell einer FE-Analyse (vgl. **Abbildung 6-32**) unterzogen, die zu den folgenden Ergebnissen führt:

- Die Streckgrenze ist wie beim Original-Gelenkarm (vgl. Abbildung 6-27) mit  $1.75 \cdot 10^7 \text{ N/mm}^2$  identisch.
- Der Sicherheitsfaktor ist mit einem minimalen Wert von 2,82 (vgl. **Abbildung 6-31**) unwesentlich besser als bei dem Gelenkarm mit 2,73 (vgl. Abbildung 6-26).
- Die maximale Spannung mit  $6,2 \cdot 10^7 \text{ N/mm}^2$  (vgl. **Abbildung 6-32**) liegt minimal unter dem Wert des Gelenkarmes mit  $6,4 \cdot 10^7 \text{ N/mm}^2$  (vgl. Abbildung 6-27). Daraus lässt sich schließen, dass auch der DIL-Träger gemäß der rechnergestützten FE-Analyse den Belastungen standhält.

Die mittels der FE-Analyse ermittelten Ergebnisse werden hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit anschließend mit einer konventionellen Rechnung überprüft. Die für die Berechnung notwendigen Werte lassen sich zwar grundsätzlich aus Tabellen der Fachliteratur entnehmen, aber das hier eingesetzte IT-System stellt diese Daten interaktiv zur Verfügung, so beträgt z.B. der Wert für das Widerstandsmoment ( $W_x$ ) =  $2363.460000 \text{ cm}^3$  (vgl. **Abbildung 6-30**).



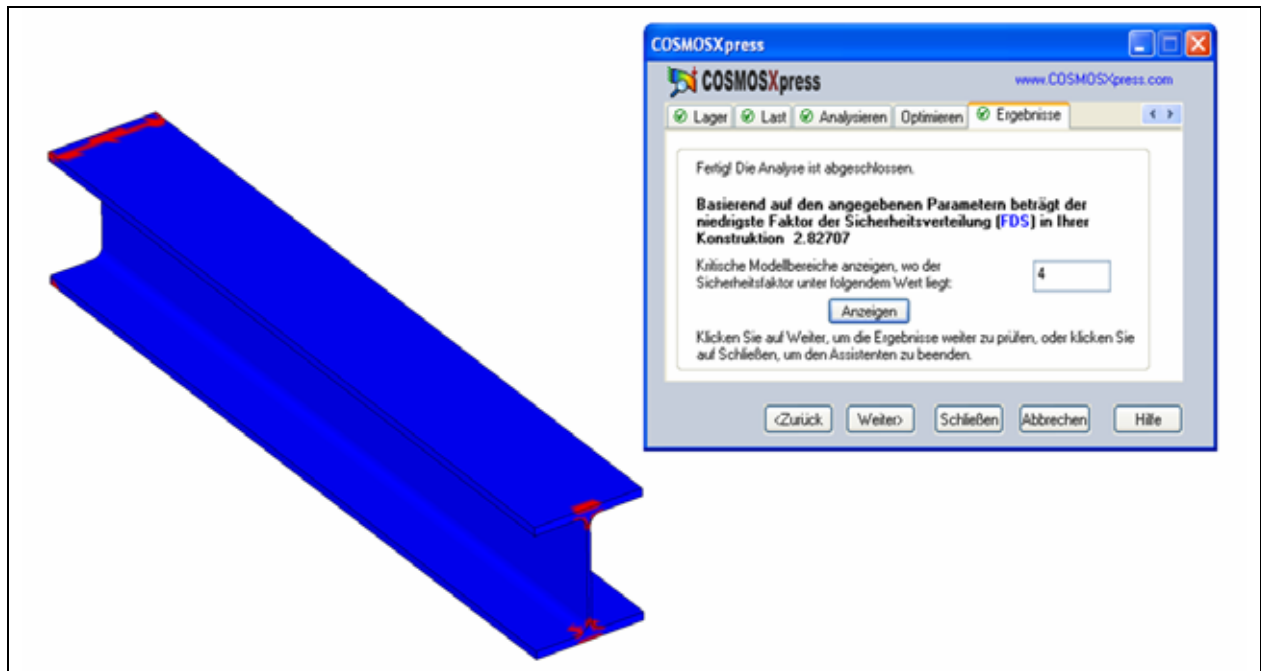


Abbildung 6-31: Sicherheitsfaktor des Ersatzmodells

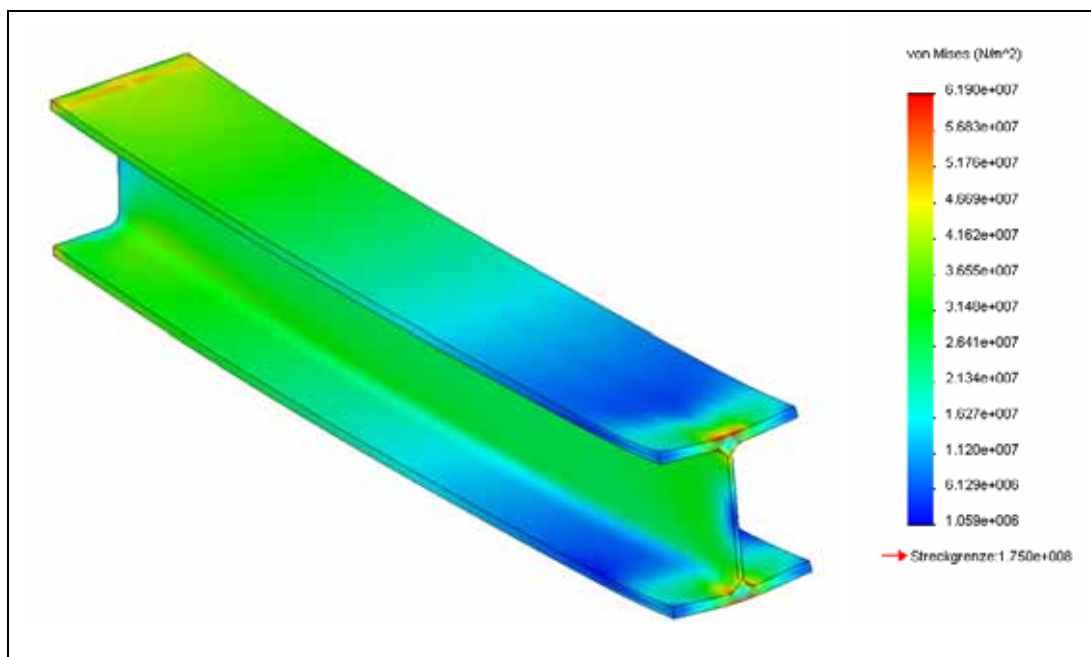


Abbildung 6-32: Festigkeitsanalyse des Ersatzmodells

Mit Hilfe der Gelenkarm-Länge von  $L = 2.000 \text{ mm}$ , der Belastung von  $F = 50.000 \text{ N}$  und dem Widerstandsmoment  $W_x = 2363.460000 \text{ cm}^3$  lässt sich die maximale Spannung  $\sigma_{(\max)}$  wie folgt berechnen:

$$\sigma_{(\max)} = F_{\max} \cdot L / W_x = 50.000 \text{ N} \cdot 2.000 \text{ mm} / 2.363,46 \text{ cm}^3 = 42.310.849 \text{ Pa}$$

(vgl. **Abbildung 6-33**).

Für die Umrechnung von Pa in N/mm<sup>2</sup> gilt: 1 Pa = 10<sup>-6</sup> N/mm<sup>2</sup>. Damit lässt sich die konventionell berechnete Spannung zu der mittels FEM ermittelten Spannung vergleichen:

$$\sigma_{(\max \text{ manuell})} = 4,23 \text{ e}+007 \text{ N/m}^2 < \sigma_{(\max \text{ FE})} = 5,17 \text{ e}+007 \text{ N/m}^2$$

Die Spannung von 4,23 e+007 N/m<sup>2</sup> ist die Spannung an der eingespannten Seite (vgl. Abbildung 6-32). Das tabellarische Widerstandsmoment des genormten Trägers beinhaltet natürlich nur die spezielle Geometrie dieses Trägers. Hingegen wird in einer FEM-Berechnung die Bauteilgeometrie mit berücksichtigt und führt in diesem Fall zu einer etwas höheren Spannung.

Daraus ergibt sich, dass der konventionell ermittelte Spannungswert etwas kleiner als der Spannungswert der FE-Analyse ist und somit ist die Festigkeit des DIL-Trägers und auch die Richtigkeit des gewählten FEM-Verfahrens für den Original-Gelenkarm bestätigt. Des Weiteren wird das FEM-Berechnungsergebnis für den Original-Gelenkarm bestätigt, da das stark vereinfachte Ersatzmodell Ergebnisse liefert, die in der gleichen Größenordnung liegen.

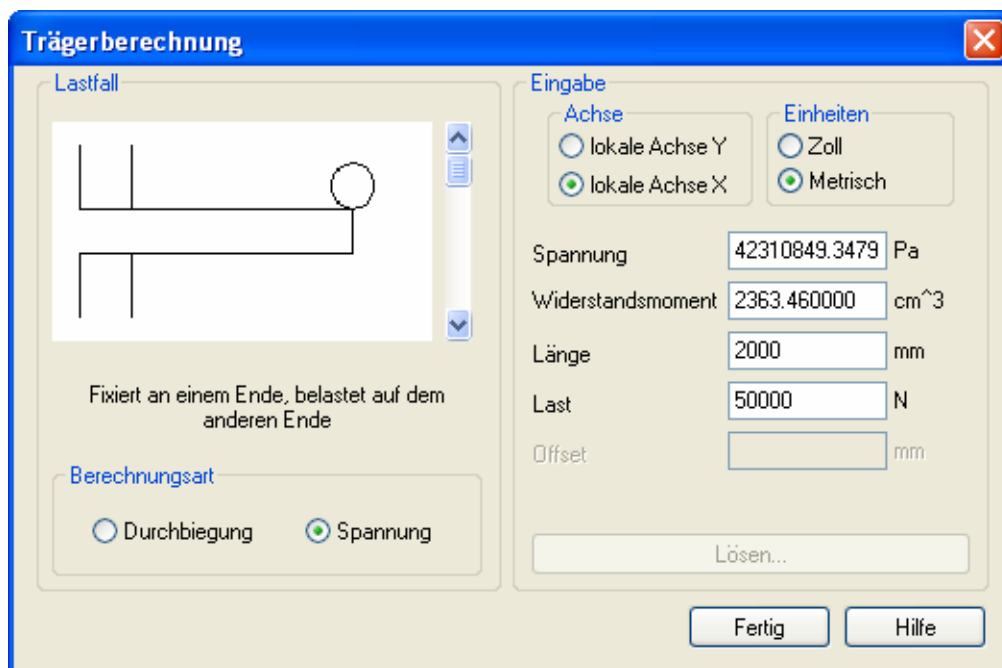


Abbildung 6-33: Spannungsberechnung DIL 360

Hinweis: Hier musste mit dem Widerstandsmoment in x-Richtung gerechnet werden, da in SolidWorks die x-Achse mit der y-Achse vertauscht ist.

## 7 Optimierung des Beispiels „Klappmechanismus“

Der Katamaran ist entsprechend den eingangs aufgestellten Anforderungen konstruiert und darüber hinaus sind alle geforderten Funktionalitäten erfüllt und die Festigkeit hinreichend nachgewiesen worden. Für zusätzliche praktische Versuche und zur Anschauung des Konzeptes auf Messen ist es nunmehr sinnvoll, zunächst einen Prototypen zu fertigen (vgl. **Abbildung 7-1** und Abbildung 3-4), mit dessen Hilfe sowohl die Funktionsfähigkeit einschließlich der kinematischen Eigenschaften des hier entwickelten Modells nachgewiesen, als auch ein sehr gutes optisches Design gestaltet werden kann.

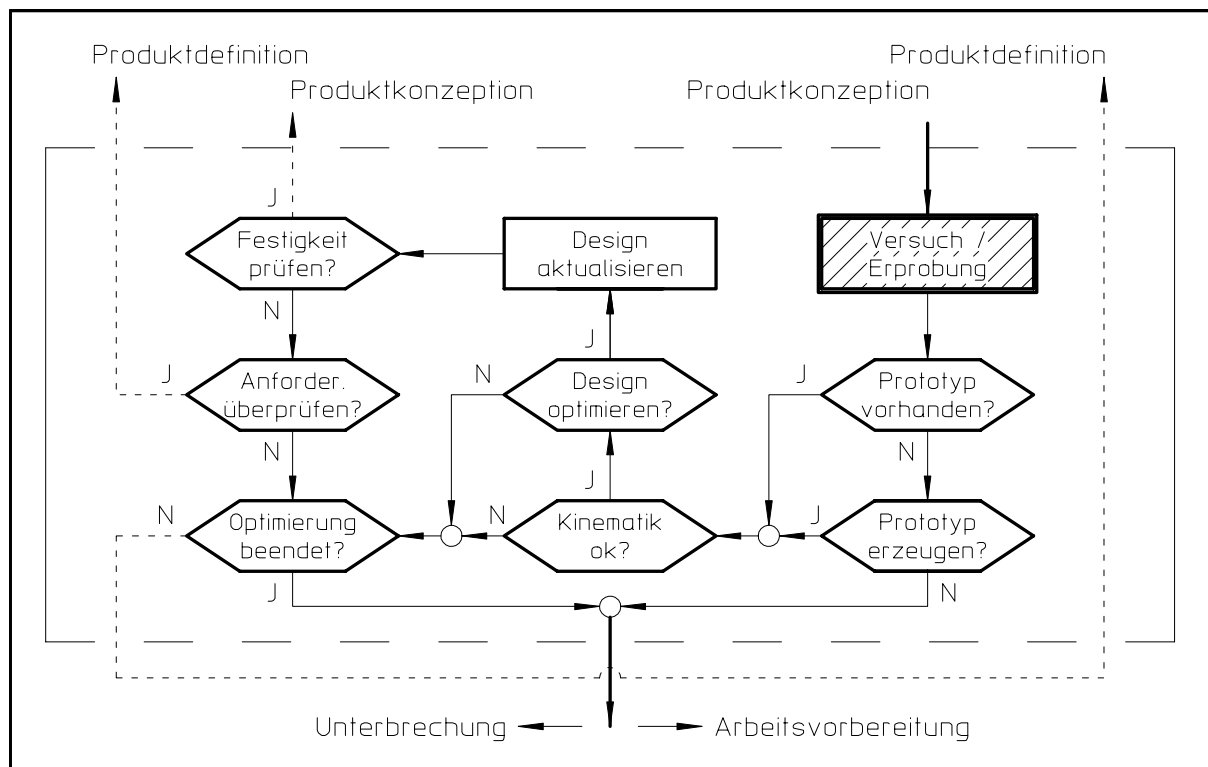


Abbildung 7-1: Phase Versuch / Erprobung

Dieser letzte Detailprozess innerhalb des Produktentwicklungsprozesses zeigt besonders deutlich die möglichen Wechselwirkungen und Rückkopplungen, da hier jeweils die beiden vorgeschalteten Detailprozesse Produktkonzeption und Produktdefinition zur Vervollständigung einer endgültigen Lösung erforderlich sind, bevor das Ergebnis dem in der Wertschöpfungskette (vgl. Abbildung 3-4) nachgeschalteten Detailprozess Arbeitsvorbereitung zur Verfügung gestellt werden kann.

Vor dem Hintergrund, dass zu diesem Zeitpunkt noch nicht abschließend beurteilt werden kann, ob eine wirtschaftliche Herstellung eines Modells gegeben ist, lassen sich zusammengefasst die folgende Gründe für die Herstellung eines Modells (Prototyp) formulieren:

- Überprüfen der Funktion in der Praxis
- Visuelle Beurteilung des Gesamtkonzeptes
- Durchführen von praktischen Tests
- Untermauern der Ernsthaftigkeit des Projektes
- Nutzbarmachung für Fotos und Marketing
- Präsentationsmöglichkeit vor einem breiten Publikum

Für die Erstellung eines Modells gibt es verschiedene Möglichkeiten:

1. Ein Modell kann aus dem Vollen gefräst werden (Modellbau) oder, was für derartige Anforderungen zeitgemäßer erscheint, es kann ein STL-Modell erzeugt und nach dem Stereolithographie-Verfahren (schichtweises Auftragen von flüssigem Kunststoff) hergestellt werden. Der Nachteil dieses Vorgehens ist in der geringen Festigkeit des Modells begründet.
2. Weitergehend kann von einem Modell eine Silikonform hergestellt werden, um dann das eigentliche Teil abzugießen. Durch diesen Schritt erhöhen sich allerdings bei der Herstellung von nur einem Modell die Kosten erheblich.
3. Ein weiteres Herstellungs-Verfahren ist das so genannte Laser-Sintern, bei dem ein Pulver durch einen sehr feinen Laser schichtweise geschmolzen und dadurch verfestigt wird. Das Verfahren ist zwar teurer, dafür sind aber die Teile wesentlich stabiler als bei der Stereolithographie. Als Basis dienen hierfür ebenfalls STL-Daten, die in beliebiger Genauigkeit von jedem modernen 3D-CAD-System ausgegeben werden können, vorausgesetzt, dass ein 3D-Modell generiert wurde.

### **7.1 Erstellung eines Prototypen als Modell**

Augrund der größten Stabilität des Verfahrens und der bestmöglichen Nachbearbeitbarkeit wurde für das zu erstellende Modell hier das Laser-Sinter Verfahren gewählt (vgl. Kap. 3.7). Allerdings ist darauf zu achten, dass die Wanddicke eines Modells mindestens 0,7 mm dick ist, was bei einer einfachen Skalierung des Katamarans auf 1:20 dazu führt, dass die im Original vorhandenen 10 mm dicken Flächen nun nur noch 0,5 mm dünn und damit nicht

geeignet sind und deshalb nachgedickt werden müssen. Für die Erstellung des Modells werden deshalb alle Daten mit dem Faktor 0,05 kleiner skaliert und dann teilweise nachbearbeitet. Ebenso dürfen einzelne Teile nicht zu groß sein und so wird z.B. der Mast geteilt.

Nach der konstruktiven Anpassung der einzelnen Teile auf das maßstabsgetreue Modell, müssen innerhalb der Baugruppe erneut die Funktionen und vor allem die Interferenzen geprüft werden. Darüber hinaus mussten die Passungen der Verbindungen der Gelenkarme mit dem Deckaufbau und den Schwimmern mit 0,2 mm Luft nachbearbeitet werden, da bei allen STL-Verfahren mit einer Abweichung von 0,3 - 0,4 mm gerechnet werden muss.



Abbildung 7-2: Modellausschnitt mit unbehandelten Oberflächen (M 1:20)

Unter der Berücksichtigung der genannten Randbedingungen wird zur Überprüfung der Machbarkeit des vorgestellten Konzeptes für den neuen trailerbaren Katamaran mit Hilfe des Laser-Sinter-Verfahren ein Modell im Maßstab 1:20 gefertigt (vgl. **Abbildung 7-2**). Das Laser-Sinter-Verfahren wird deshalb gewählt, da die Einzelteile bei dieser Methode eine relativ große Festigkeit aufweisen und so die Funktionen, die diesen Katamaran aus-

zeichnen, sehr gut darstellen und überprüft werden können. Der gewählte Maßstab 1:20 gestattet darüber hinaus, dass das Modell einfach handhabbar ist und ohne großen Aufwand transportiert werden kann. Des Weiteren musste bei der Wahl der Abmessungen auch darauf geachtet werden, dass eine Fertigung auf der zur Verfügung stehenden Maschine auch möglich ist. Eine weitere äußerst wichtige Rolle für die Wahl des Verfahrens war der Kosten- / Nutzen-Effekt für die Herstellung des Modells.

Die Oberflächen des Prototyps sind zunächst sehr porös und uneben (vgl. **Abbildung 7-2**). Vor einer weiteren Bearbeitung muss ein mehrfacher Anstrich mit einem Epoxidharz vorgenommen werden. Dieses Harz zieht in die Poren ein, erhöht dadurch die Festigkeit und glättet die raue Oberfläche ein wenig. Nach dem Abschleifen aller Flächen und einem anschließenden Spachteln und einem erneuten Abschleifen, folgt eine Behandlung mit einem Sprühspachtel. Das nachfolgende Abschleifen und mehrfache Lackieren führt dann zu einem optisch ansprechenden Finish. Das auf diese Art und Weise erzielte Ergebnis zeigen nachfolgend die **Abbildung 7-3** und die **Abbildung 7-4**.

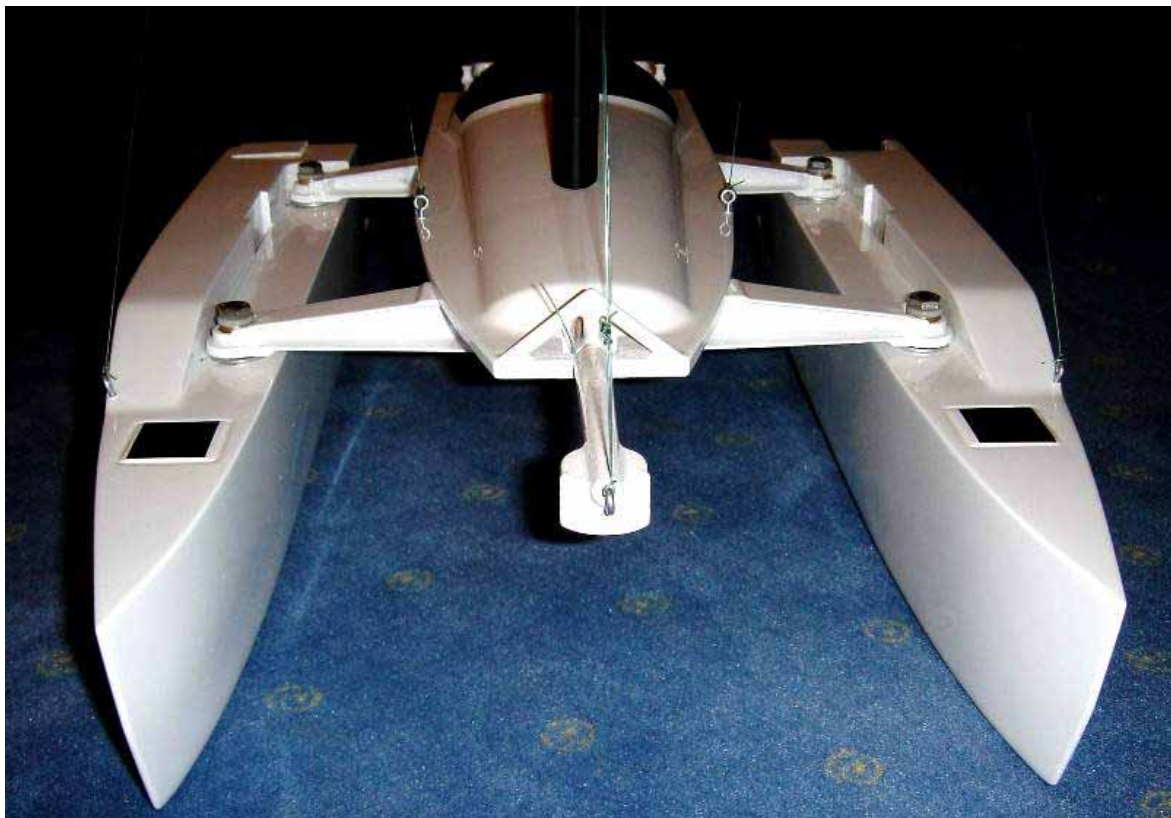


Abbildung 7-3: Katamaran mit ausgefahrenem Schwimmer, Ansicht von vorne

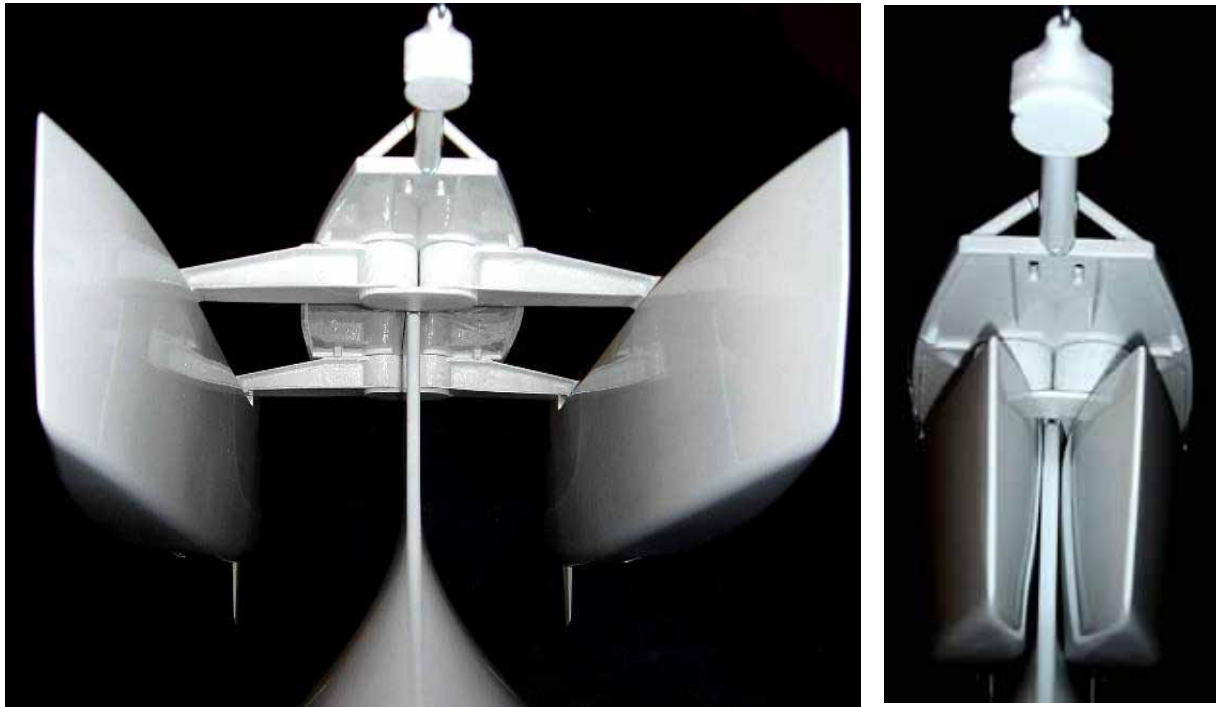


Abbildung 7-4: Katamaran in ausgefahrener und zusammengefahrter Stellung (Ansicht von vorn)

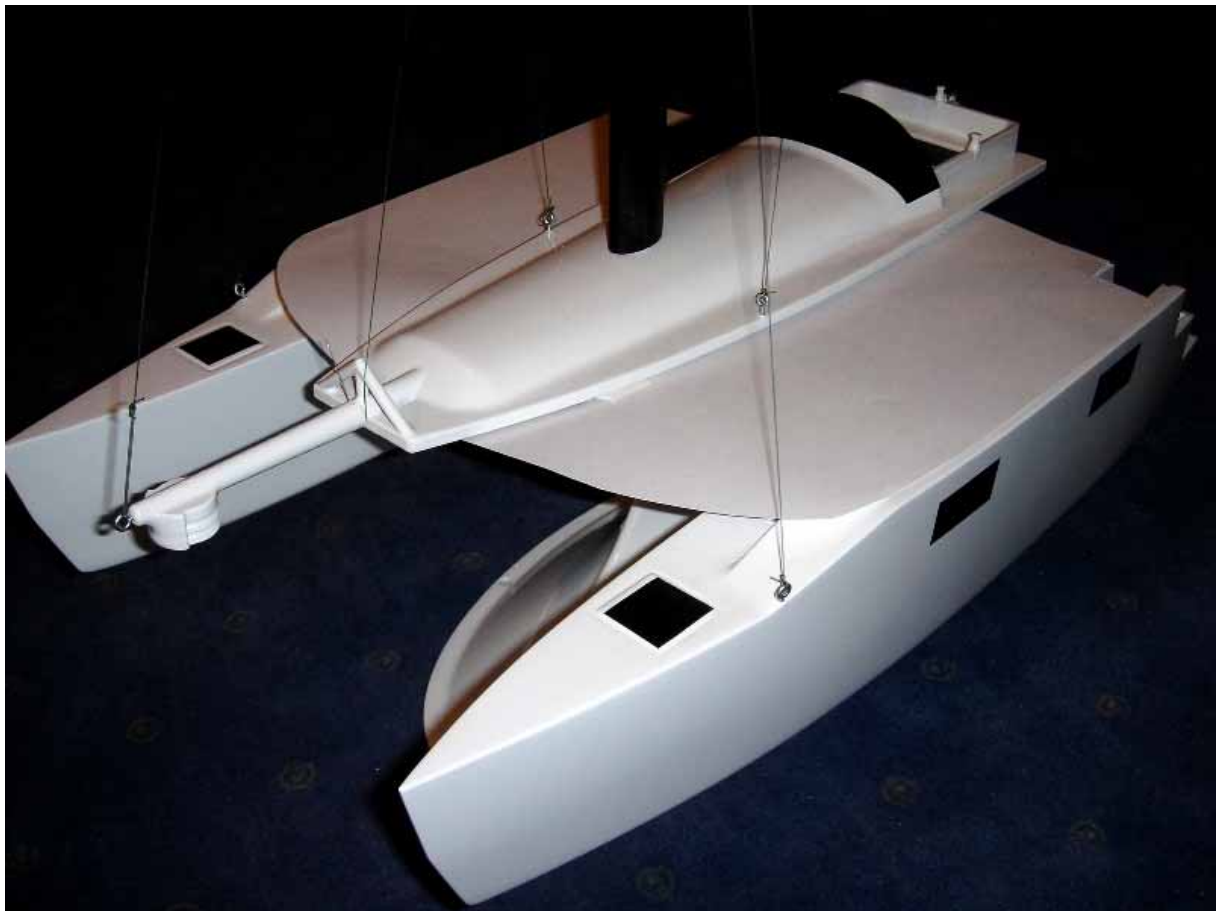


Abbildung 7-5: Katamaran mit Trampolin



Das in der **Abbildung 7-4** dargestellte Modell zeigt sehr anschaulich die Gesamtoptik des Katamarans bezüglich der Funktionsweise des Klappmechanismus. Zur besseren optischen Beurteilung wurde durch eine Schablone das später eingesetzte Trampolin angedeutet, wie in der **Abbildung 7-5** dargestellt. Damit die Funktionsfähigkeit des Katamarans den Interessenten einfacher präsentiert werden kann, erhält das Modell einen Fuß (vgl. **Abbildung 7-6**). Jetzt können die Schwimmer frei und ohne Bodenberührung ausgefahren und zusammengefahren werden.

Für eine Beurteilung des gesamten Designs ist auch die Optik des Katamarans wichtig, deshalb ist der Katamaran noch einmal mit zusammengefahrenen Schwimmern aus einem anderen Blickwinkel gemäß der **Abbildung 7-7** wiedergegeben. Schließlich sind Boote sicherlich auch so genannte „*Prestigeobjekte*“, die aus jedem Betrachtungswinkel und in jeder Situation „*gut aussehen*“ sollen. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass die Boote einen großen Teil ihres Lebenszyklus im Hafen oder auf einem Trailer verbringen.



Abbildung 7-6: Katamaran auf Fuß mit zusammengefahrenen Schwimmern





Abbildung 7-7: Katamaran Heckansicht mit zusammen gefahrenen Schwimmern

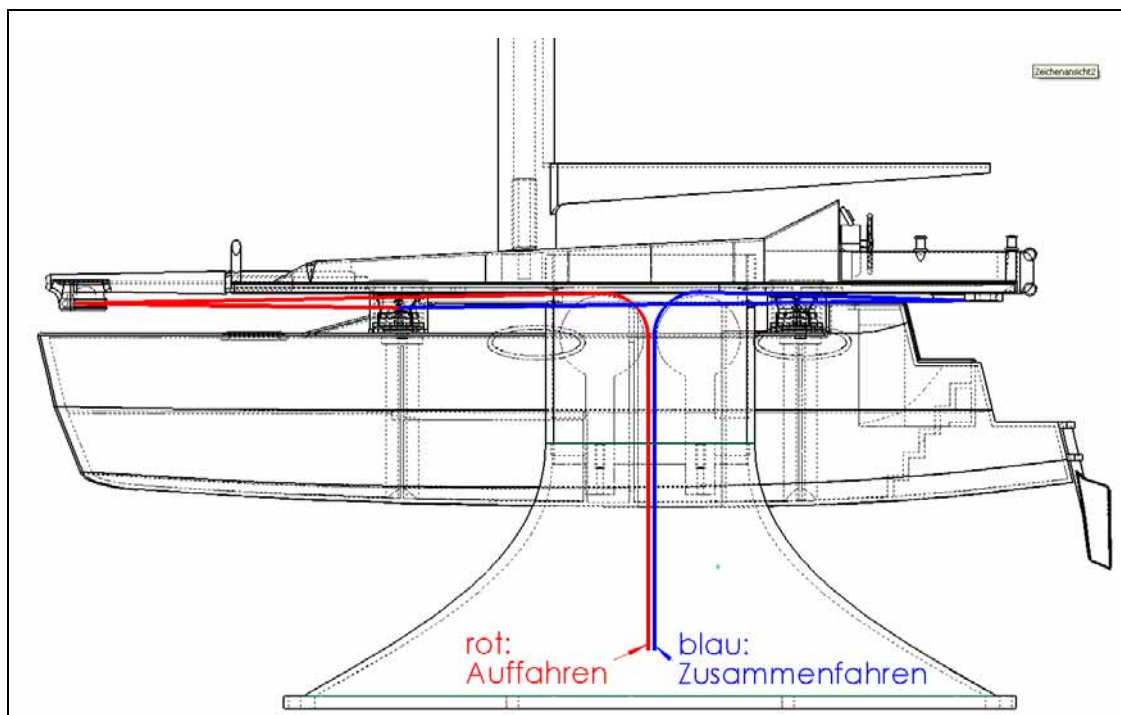


Abbildung 7-8: Vorderansicht des Mechanismus zum Verfahren der Schwimmer

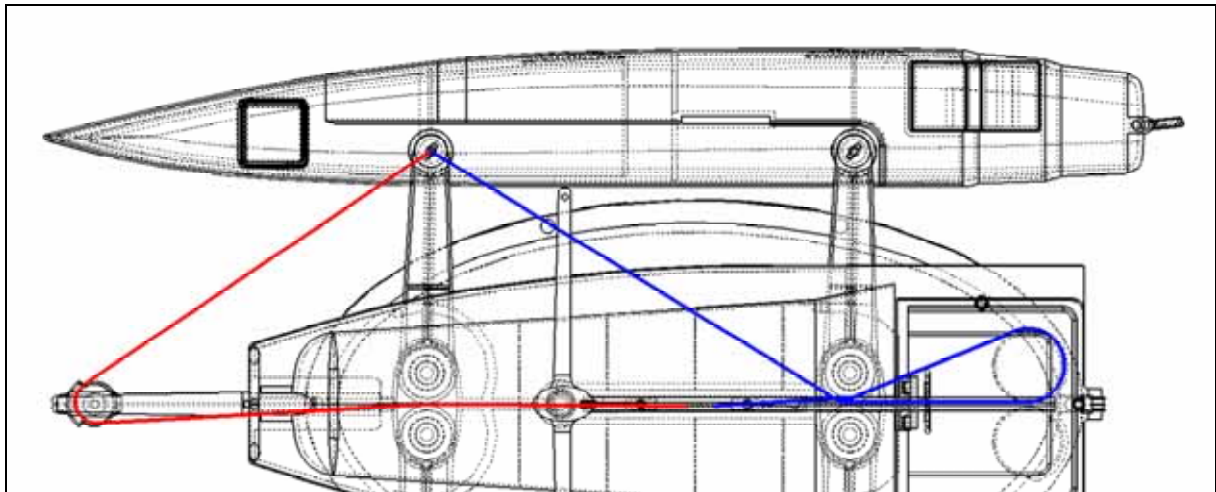


Abbildung 7-9: Draufsicht des Mechanismus zum Verfahren eines Schwimmers

Damit die Überprüfung der Funktionalität der Kinematik in einer Präsentation automatisiert ablaufen kann, ist zusätzlich die Entwicklung einer Mechanik erforderlich, die dem Original entsprechend, mit Leinen betätigt werden kann und das Verfahren der Schwimmer zeigt. Für diesen Automatismus wird allerdings ein Elektromotor eingesetzt, der wegen des Platzbedarfes im Fuß platziert werden soll. Deshalb müssen die Leinen zum Auffahren und Zusammenfahren beider Schwimmer über Umlenkrollen in den Fuß geleitet werden (vgl. **Abbildung 7-8** und **Abbildung 7-9**).

## 7.2 Optimierung des Konzeptes

Mit der Herstellung eines Prototyps ist ein reales Abbild des Konzeptes gegeben. Mit Hilfe dieses Modells besteht nunmehr die Möglichkeit, die Machbarkeit dieses Konzeptes mit verschiedenen Experten (Boothersteller, Sportsegler, etc.) zu diskutieren, um gegebenenfalls mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen weitere Optimierungen bezüglich der Geometrie einzelner Komponenten, des Design des Bootes bis hin zu Änderungen der Produktkonzeption vorzunehmen (vgl. **Abbildung 7-1**). In diesem Zusammenhang kommt der Iterationsprozess einer Produktentwicklung besonders deutlich zum Ausdruck.

Für derartig weit reichende Optimierungsbemühungen ist das Einholen von Expertenmeinungen sowohl über das Internet (vgl. **Abbildung 11-6**) oder mittels einer Ausstellung des Prototyps auf einer Fach-Messe (vgl. **Abbildung 11-7**) sicherlich äußerst sinnvoll. Für diesen Auftritt in der Öffentlichkeit (Internet und Messe) werden neben der Darstellung des

Prototyps weitere bildliche Darstellungen publiziert und darüber hinaus ein Kontaktbogen (vgl. **Abbildung 11-8**) erarbeitet, der den wirklichen Interessenten die Gelegenheit geben soll, das bisherige Ergebnis des Konzepts zu bewerten und sich durch eigene Wünsche und Anregungen an der Weiterentwicklung des Katamaran-Konzeptes zu beteiligen. Mit der Auswertung dieser Anregungen und dem Ergebnis der Diskussionen der Experten-Meinungen kann nun das hier vorliegende Konzept systematisch weiter verbessert werden, vorausgesetzt, der Verfasser dieser Arbeit kann sich diesen Änderungsvorschlägen auch wirklich anschließen.

Die momentan aktuelle Konstruktion des Katamarans genügt hinsichtlich der Festigkeit der Gelenkarme, des Raumangebotes sowie des Design weitgehend den gestellten Anforderungen. Für bessere Segeleigenschaften und eine erhöhte Sicherheit der Crew können nun noch einige kritische Punkte analysiert und verbessert werden. Ebenso können einige Verbesserungen für eine eventuell spätere wirtschaftliche Nutzung des Konzeptes ausschlaggebend sein. Die Verbesserungen sind unter anderem für den technischen Bereich:

- Die Auslegung der Gelenkarme und das entstehende Gewicht des Mitteldeck-Aufbaus.
- Der durch den weit oben liegenden Deckaufbau hohe Schwerpunkt.
- Schlechtere Segeleigenschaften und mehr Gesamthöhe auf dem Trailer wegen der festen Kiele.

und für den Komfort:

- Schwieriger Gang von der Pflicht (Steuerstand) in einen der Schwimmer, vor allem bei rauer See, da sich die Luken achtern (hinten) befinden.
- Das erforderliche Anbringen von Relings zur Sicherheit rund um das Boot.
- Die Raumaufteilung in den Schwimmern.

Diese einzelnen Punkte werden nun ohne Berücksichtigung einer Priorität nachfolgend sukzessiv bearbeitet. Zur besseren Aufnahme des Kippmoments, ausgelöst durch eine horizontale Kraft, die durch eine Wind- und Welleneinwirkung zwischen den Gelenkarmen und den Schwimmern entstehen kann, wird der Abstand der Aufnahmepunkte eines Gelenkarmes zu dem Schwimmer von vormals **320 mm** (vgl. **Abbildung 6-24**) auf nun **1.040 mm** (vgl. **Abbildung 7-10**) vergrößert. Analog dazu zeigt die **Abbildung 7-11** das 3D-Modell. Die Aufnahme der Momente an den Schwimmern kann nach wie vor über eine große

horizontale Auflagefläche erfolgen oder wie jetzt in der neuen geometrischen Auslegung vorgesehen, über einen großen Abstand des oberen und unteren Lagerpunktes des Gelenkarmes. Die Belastung wird in zwei Teilbeträge von **je 25.000 N** jeweils auf den oberen und unteren Lagerpunkt aufgeteilt.

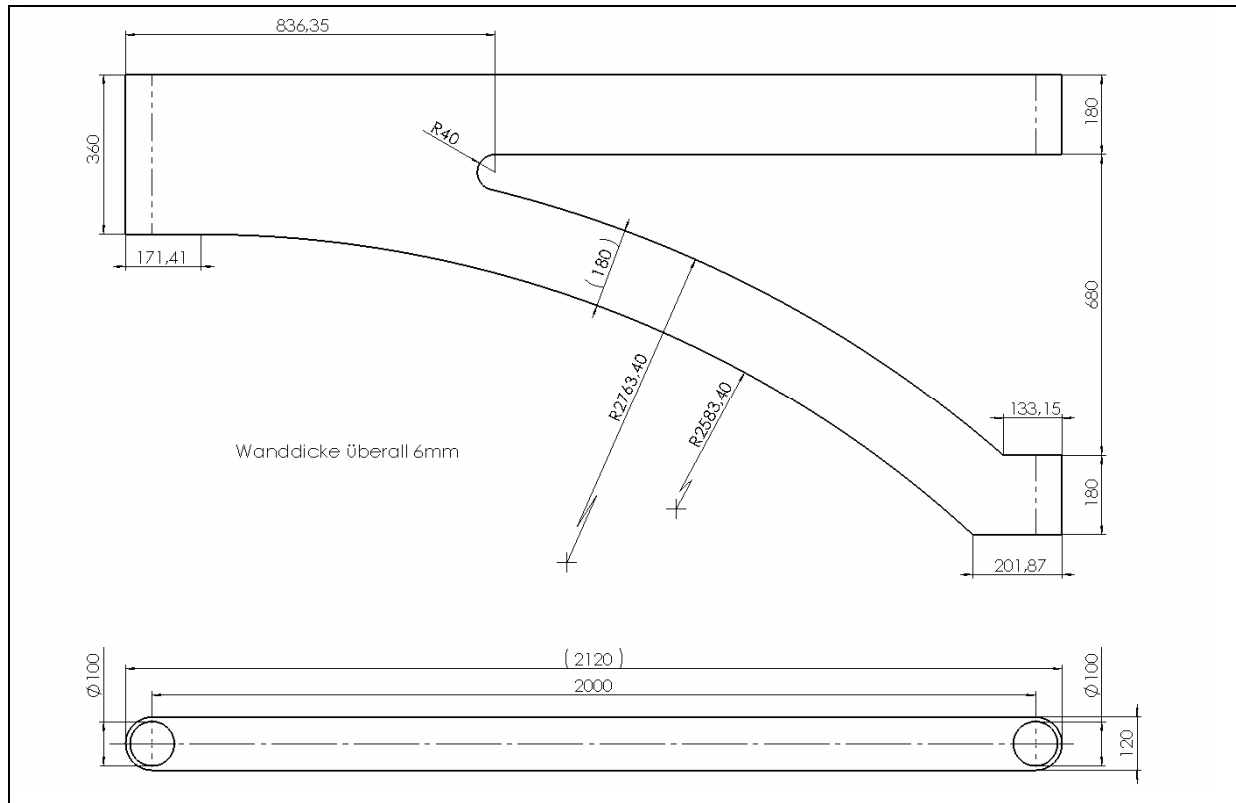


Abbildung 7-10: Konstruktion des Gelenkarm\_3 (2D)

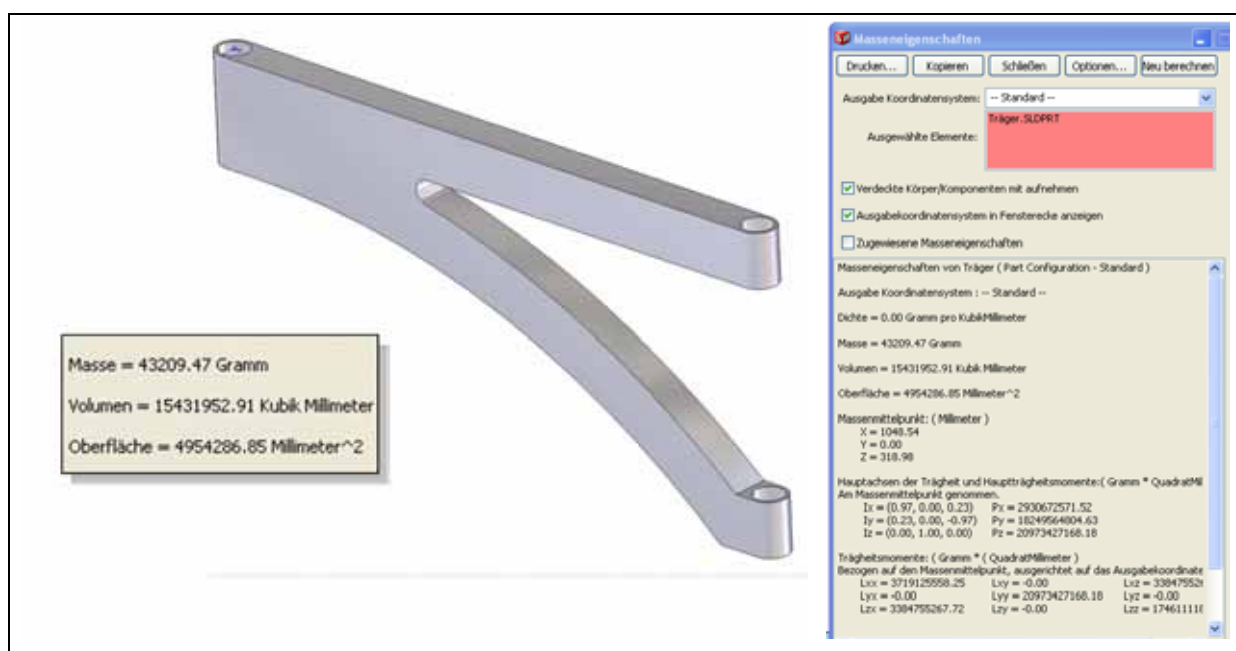


Abbildung 7-11: Konstruktion des Gelenkarm\_3 (3D) mit Angabe der Masse

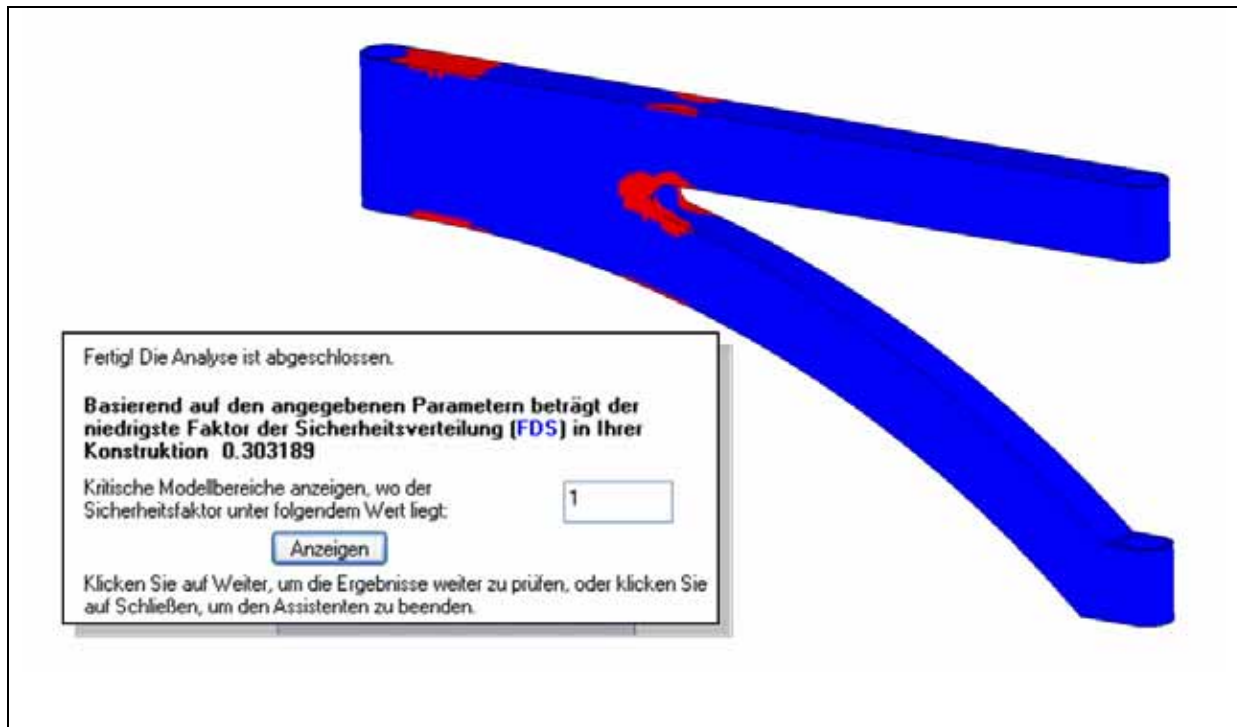


Abbildung 7-12: Sicherheitsfaktor des Gelenkarm\_3

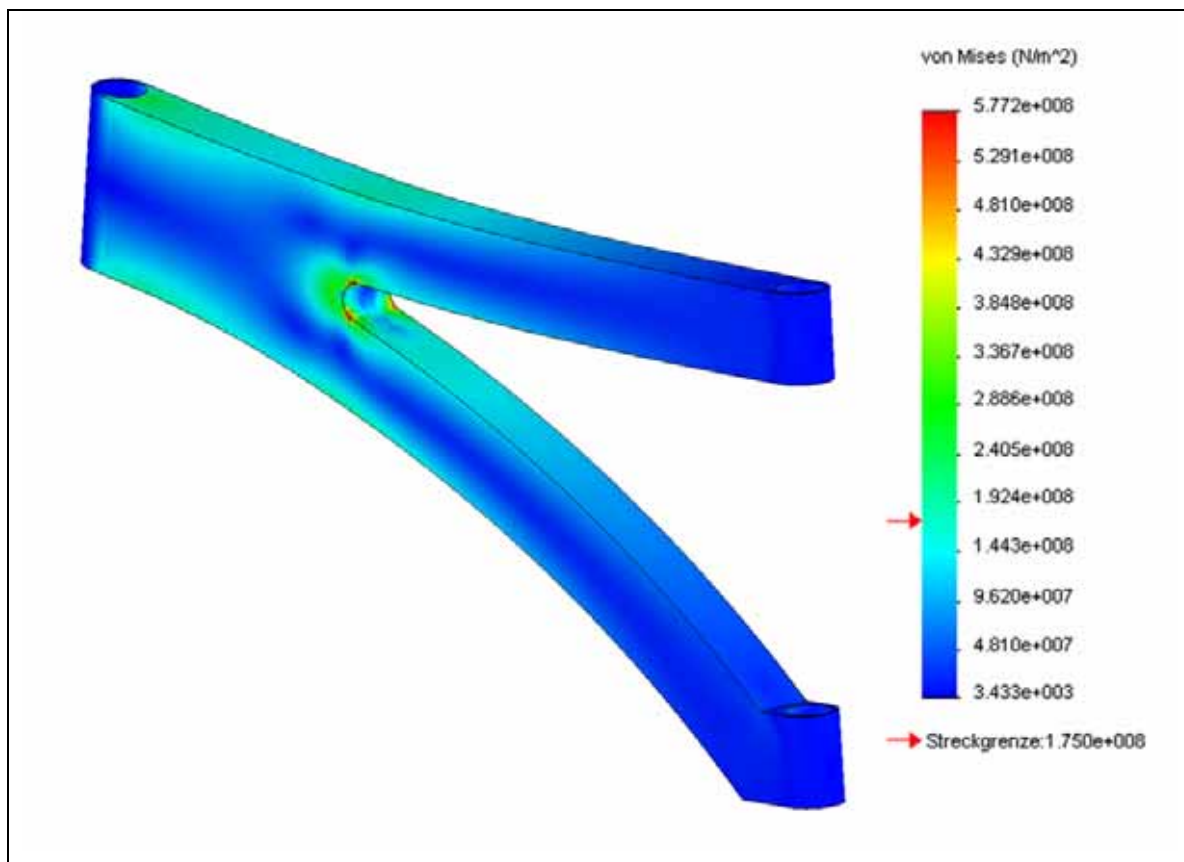


Abbildung 7-13: FE-Analyse des Gelenkarm\_3

Durch die neue Konstruktion des Gelenkarmes (Gelenkarm\_3) konnte zwar die Masse auf **43 kg** erheblich reduziert werden, aber der niedrigste Sicherheitsfaktor liegt mit einem Wert von **0,3** weit unter dem geforderten Wert von 1. Auch die Spannung zeigen an einigen kritischen Stellen (Abrundung zwischen oberem und unterem Arm) ausgeprägte Konzentrationen.

Bevor eine weitere Neukonstruktion in Angriff genommen wird, soll der Katamaran zunächst optisch überarbeitet werden, indem unter der Berücksichtigung der Berechnungsgrundlagen von [32] für eine verbesserte Stromlinienförmigkeit die Rümpfe diesen Forderungen gemäß optimiert werden. Des Weiteren wird der Teil des Bootes, der sich oberhalb der Wasserlinie befindet, stark abgerundet, damit eine bessere Windabströmung gewährleistet ist (vgl. **Abbildung 7-14** und **Abbildung 7-15**). Bei dieser Optimierung wird auf steckbare Schwerter in den Schwimmern zu Gunsten des Raumangebotes verzichtet und des Weiteren werden zunächst ein fester Kiel, ein fester Antrieb und starre nicht klappbare Ruderblätter vorgesehen. Die Verbindung zwischen dem Mitteldeck und den Schwimmern, bisher als Netz oder Trampolin (vgl. **Abbildung 7-5**) ausgeführt, wird nun in zwei ganzflächige nach oben klappbare Platten geändert (vgl. **Abbildung 7-16**).

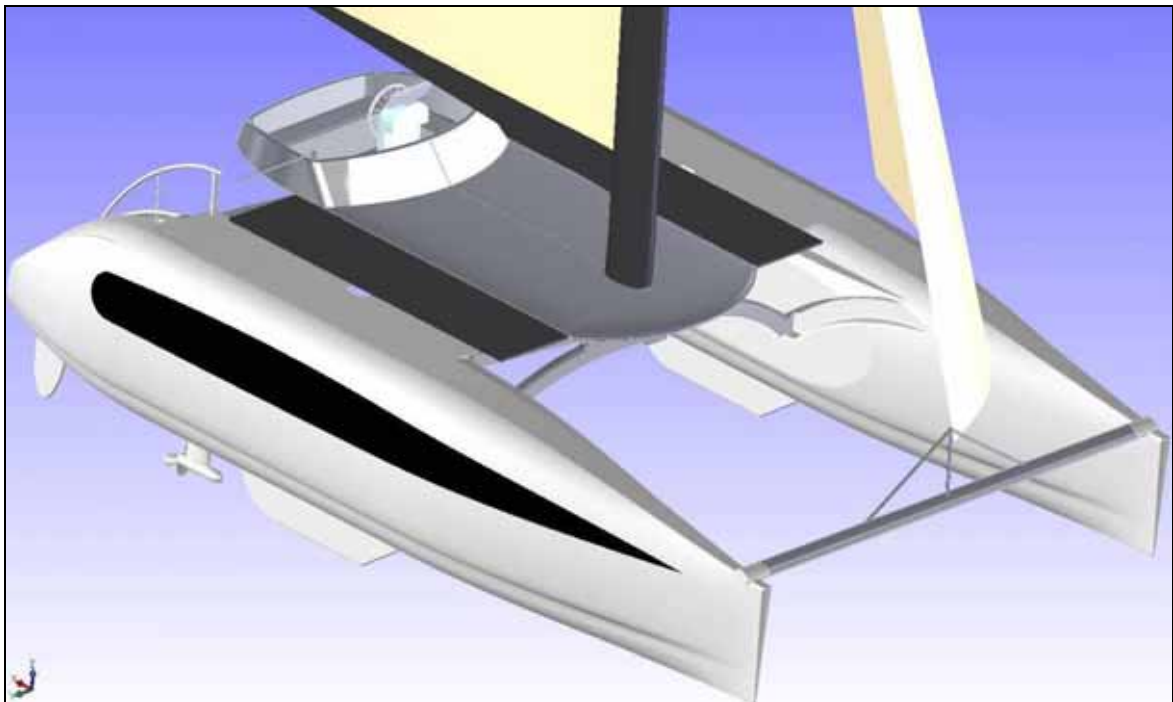


Abbildung 7-14: Optimierung, Gesamtansicht schräg vorne



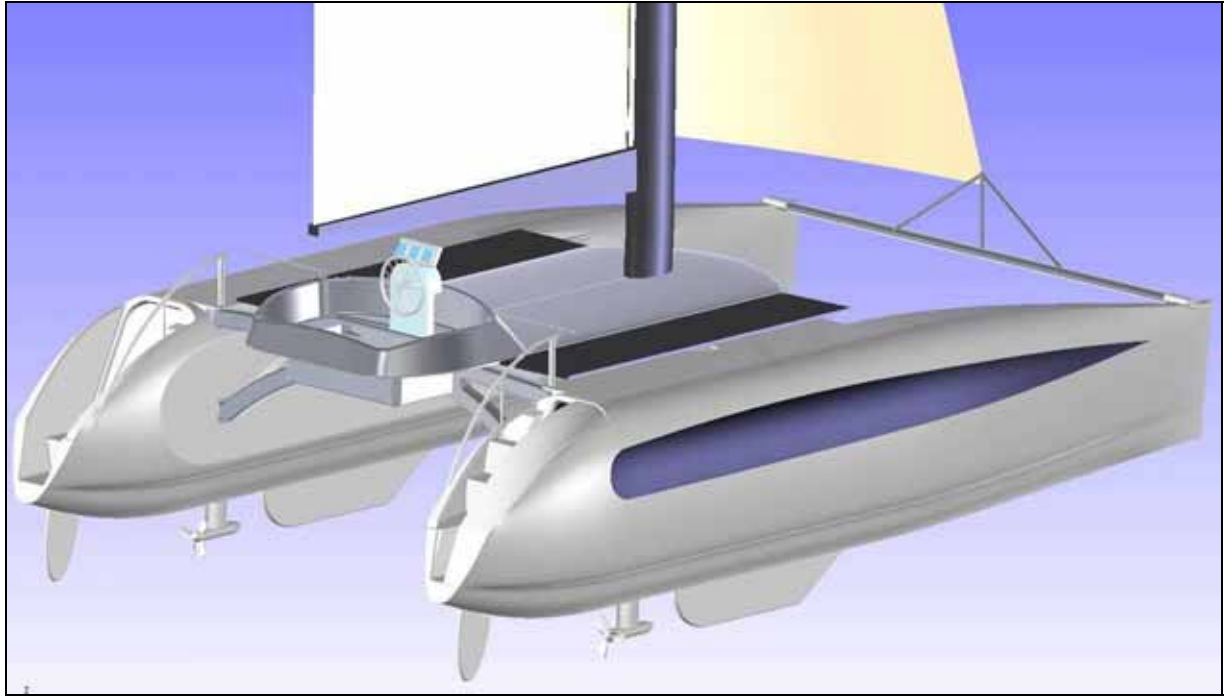


Abbildung 7-15: Optimierung, Gesamtansicht schräg hinten

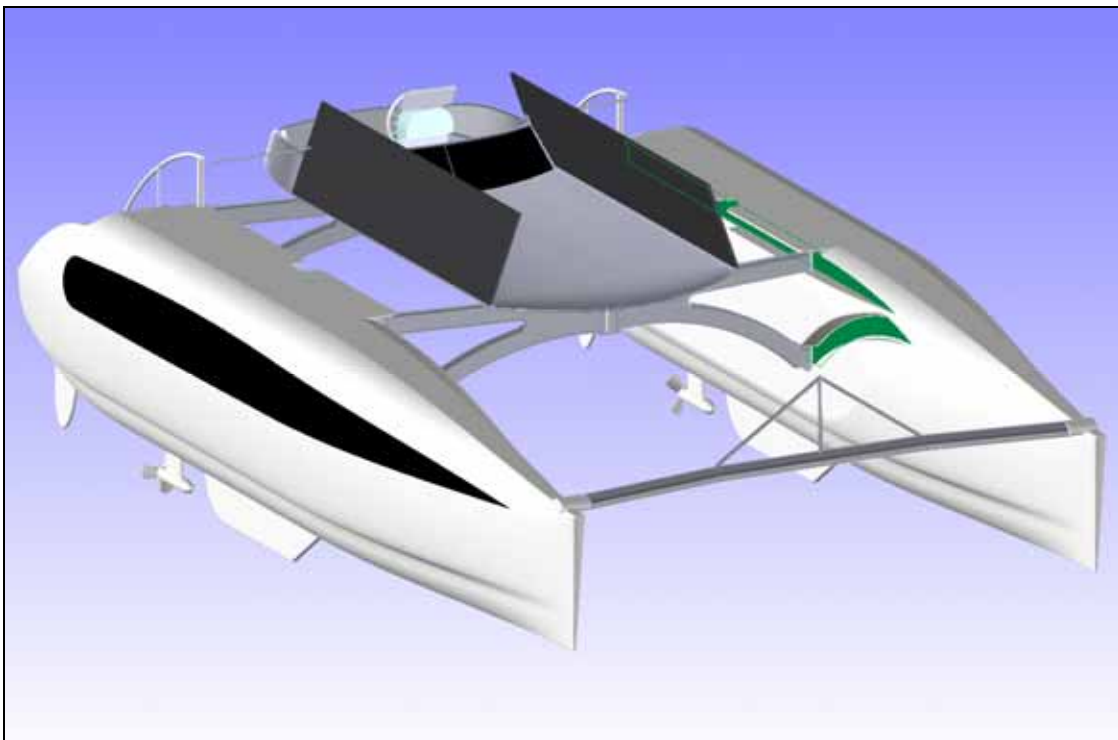


Abbildung 7-16: Optimierung, Ansicht Träger und nach oben geklappte Platten

Für eine möglichst optimale Raumnutzung werden die Schwimmer auf eine Gesamtbreite von je 1,25 Metern reduziert. Nur in den Bereichen, in denen sich die Träger in einem zusammengeklappten Zustand befinden (vgl. **Abbildung 7-17**) werden die Rümpfe innen

ausgespart und zwar so, dass ein wenig Luft verbleibt, damit keine Kollision zwischen den beiden Rümpfen entsteht. Diese Änderung ist in der Abbildung 7-16 grün angedeutet.



Abbildung 7-17: Optimierung, zusammengeklappter Zustand

Eine wesentlich wichtigere Verbesserung ist mit einer weiteren Änderung der Gestalt der Gelenkarme (vgl. **Abbildung 7-18**) möglich, da durch die neue konstruktive Gestaltung der Gelenkarme ein erhebliches Verbesserungspotential erreicht wird. Dies ist im Einzelnen:

- eine Verringerung des Gewichtes um 50%,
- eine höhere Stabilität,
- die Gelenkarme dienen gleichzeitig vorne und hinten als Reling,
- durch die Anbringung der Gelenkarme sehr weit außen an den Schwimmern wird ein nutzbarer Raum in den Schwimmern gewonnen und
- durch eine verbesserte Auslegung der Gelenkarme können einfache Nylon-Gleitlager verwendet werden.

Der Abstand zwischen den beiden Lagerungen ist mit 2 m konstant geblieben. Hingegen wurde für die Höhe des Gelenkarms gegenüber den bisherigen Gelenkarmen Gelenkarm\_2 = 320 mm (vgl. Abbildung 6-29) und Gelenkarm\_3 = 1.040 mm (vgl. Abbildung 7-10) ein mittleres Maß von jetzt **600** mm gewählt. Diese neue konstruktive Entwicklung des Gelenkarmes beinhaltet auch eine neue Konstruktion der Lagerung (vgl. **Abbildung 7-19**). Ebenso ändert sich der bisherige Deckaufbau dahingehend, dass nun nur noch eine Mittelstrebe notwendig ist. Diese konstruktiven Änderungen ziehen auch eine Änderung der



geometrischen Formen nach sich, so dass diese Komponenten gemäß der in Kapitel 6.4 beschriebenen Festigkeitsanalyse einer erneuten Nachrechnung unterzogen werden müssen. Im Gegensatz zu dem Gelenkarm\_2 gemäß der Abbildung 6-25 wiegt der neue Gelenkarm\_4 (vgl. Abbildung 7-18) jetzt nur noch **35 kg** gegenüber 105 kg vorher. Das heißt, das Gewicht eines Gelenkarms ist auf 30% reduziert.

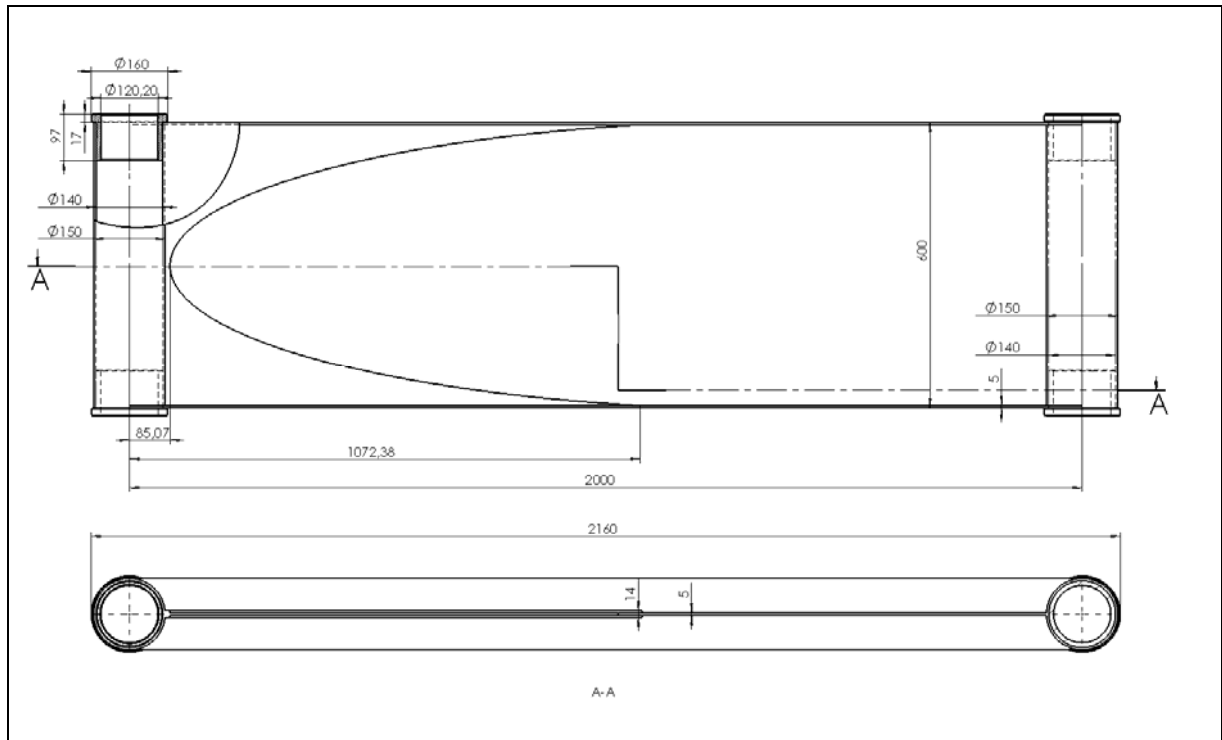


Abbildung 7-18: Konstruktion des Gelenkarm\_4 (2D)

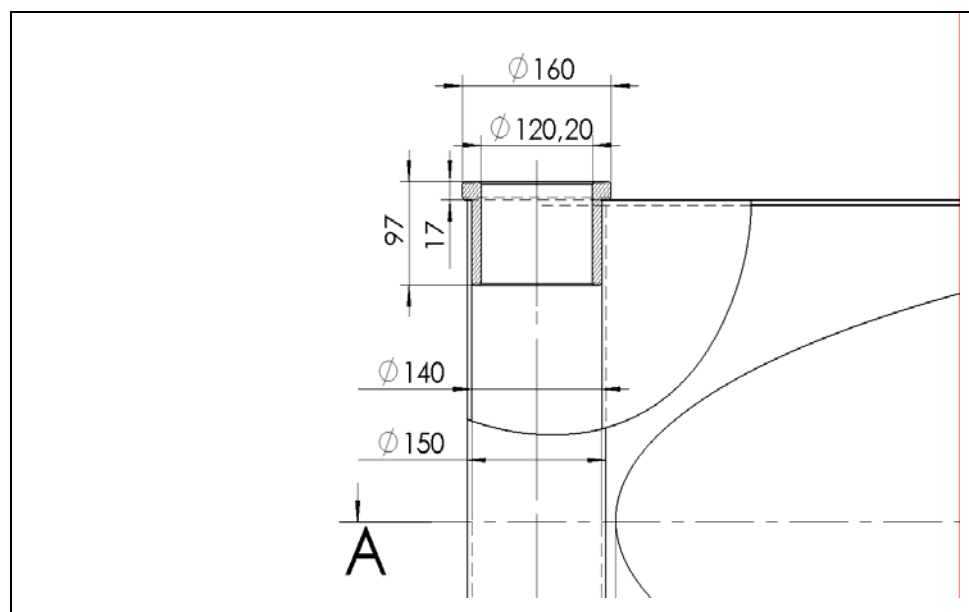


Abbildung 7-19: Detail der Konstruktion des Gelenkarm\_4 (2D)

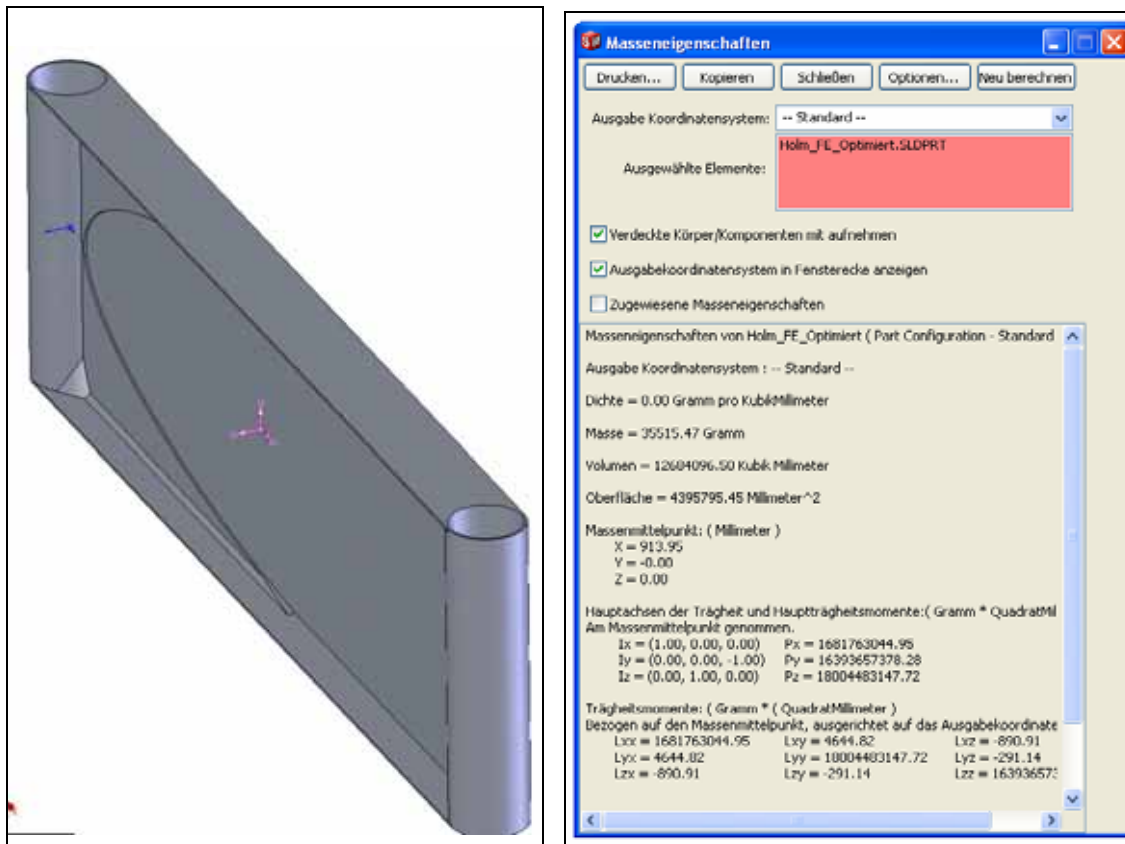


Abbildung 7-20: Konstruktion des Gelenkarm\_4 (3D) mit Angabe der Masse

Die FEM-Berechnung des neuen Gelenkarms ergab bei der Verwendung des gleichen Werkstoffes eine erhebliche Verbesserung der Festigkeitswerte (vgl. **Abbildung 7-22**). Neben der Festigkeitsberechnung für den Gelenkarm wird nun auch das Lager auf seine Festigkeit untersucht, da die Lager die Verbindung zwischen den Gelenkarmen und den Schwimmern sowie zwischen den Gelenkarmen und der Mittelstrebe darstellen. Der Abstand der beiden Lagerungen bzw. Einspannungen eines Gelenkarms hat sich bei der neuen Auslegung nicht geändert (vgl. Abbildung 7-10 mit Abbildung 7-18). Die geometrische Gestaltung der Lager ist prinzipiell durch die Geometrie des Gelenkarms vorgegeben. Variabel sind gemäß der Abbildung 7-19 lediglich die Länge des Lagers (97 mm), die Wanddicke (10 mm) und die Gestaltung der Auflage ( $d = 160$  mm und  $h = 17$  mm). Diese endgültigen Lagerabmessungen sind natürlich nicht willkürlich gewählt worden, sondern erst durch einige aufeinander aufbauende FEM-Simulationen ermittelt worden.

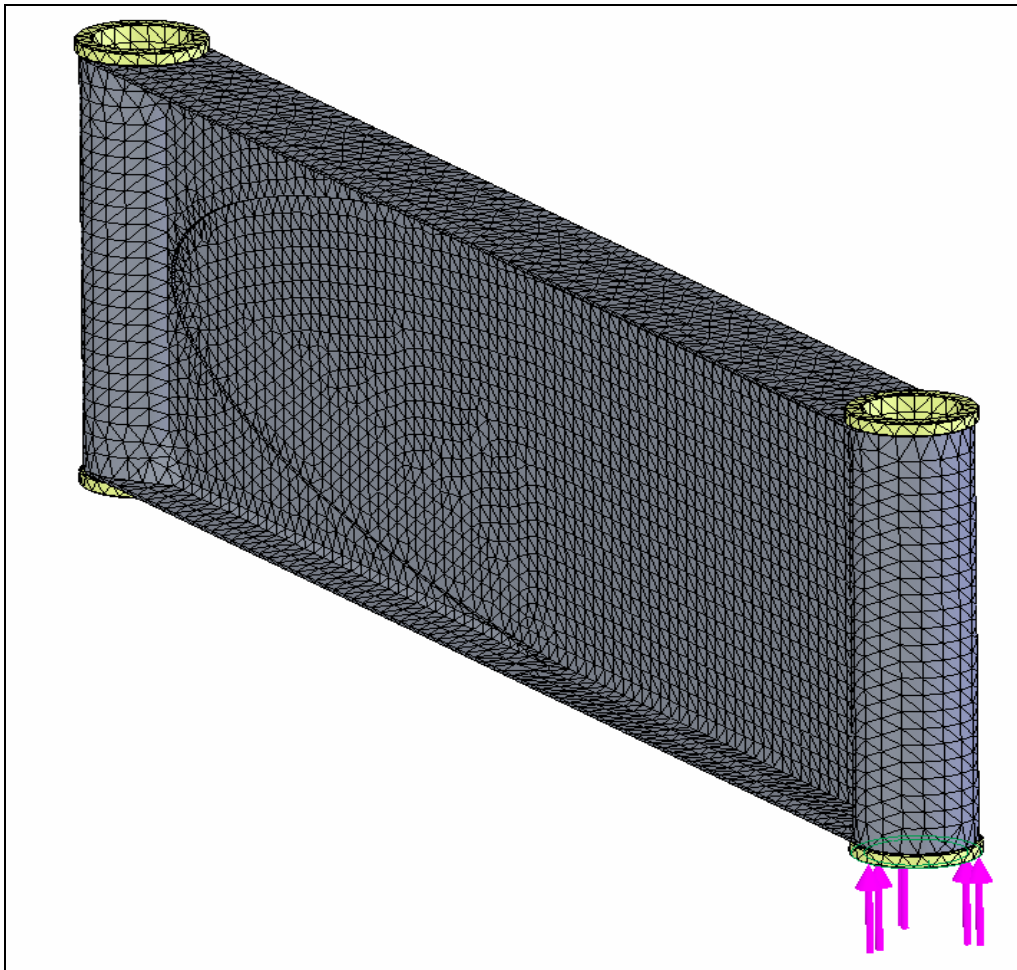


Abbildung 7-21: FE-Vernetzung Gelenkarm\_4 mit Lager

Die Berechnung der Festigkeit des Lagers wird wiederum auf der Basis einer Vernetzung des 3D-CAD-Modells von Gelenkarm und Lager (vgl. Kapitel 6.4) vorgenommen (vgl. **Abbildung 7-21**). In dieser Abbildung ist auch grafisch die Kraft angedeutet, die an dem unteren Lager normal auf der Lagerstirnfläche mit einer Kraft von 50.000 N angreift. Auf der anderen Seite ist der Gelenkarm drehend gelagert, in den anderen Achsen hingegen fix.

Das Ergebnis für die hier errechnete Festigkeit des Gelenkarms einschließlich des Lagers ist höher als eine vorab berechnete Festigkeit ohne Lager, das heißt, die Spannungen des Gelenkarms ohne Lager sind wesentlich höher als die Spannungen des Gelenkarms mit den dazwischen liegenden Lagern. Eventuell ist dieser Umstand damit zu erklären, dass sich durch die Lager die aufliegenden Flächen vergrößern. Die FE-Analyse führt zu einer Spannungsspitze von  $9,931e+007 \text{ N/mm}^2$  bei einem Sicherheitsfaktor von **2,8** (vgl. **Abbildung 7-23**). Damit ist nachgewiesen, dass die Gelenkarme ausreichend dimensioniert sind und die Festigkeit ausreichend ist. Die ursprünglich definierte zusätzliche niedrigste Sicherheit von **1,26 plus 5%** wegen der reduzierten Steckgrenze ist deutlich übertroffen.

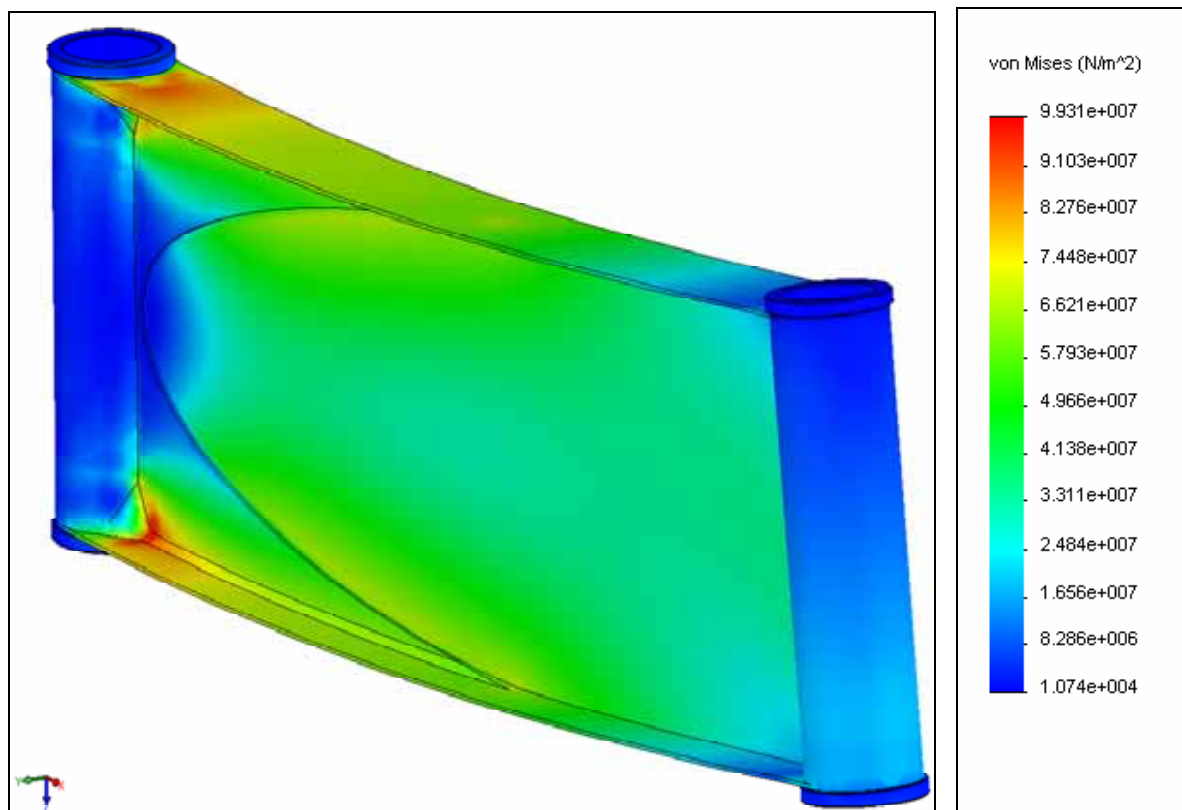


Abbildung 7-22: FE-Analyse des Gelenkarm\_4 mit Lager

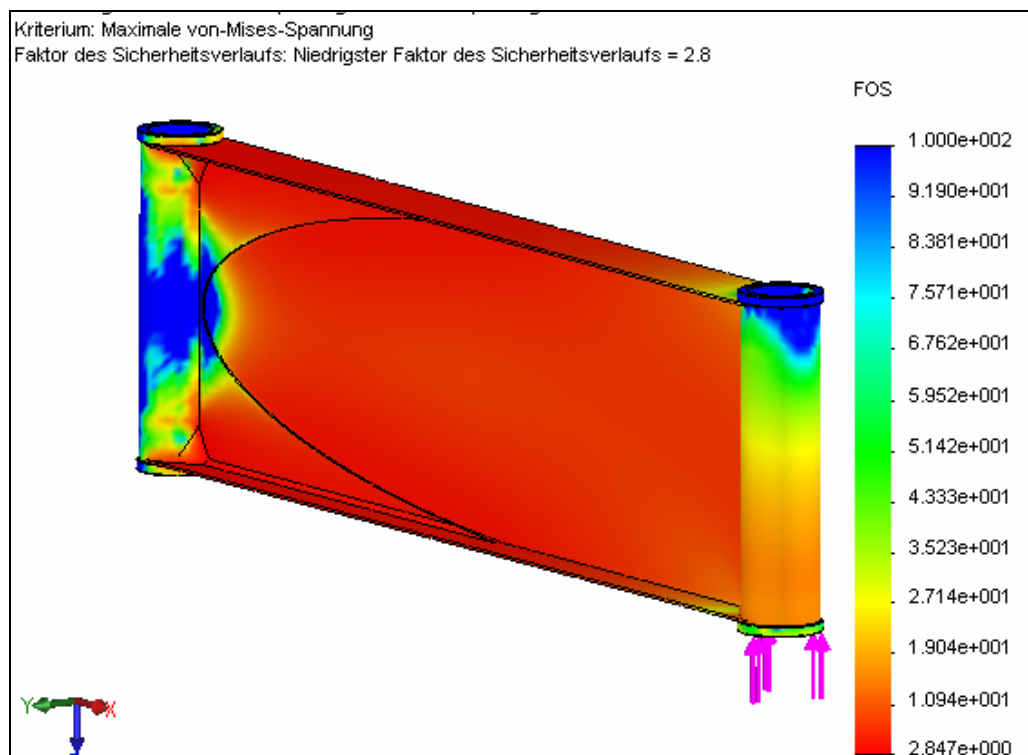


Abbildung 7-23: Sicherheitsfaktor des Gelenkarm\_4 mit Lager

In einer weiteren Optimierung des Katamarans soll nun noch ein Schwert mittig und klappbar angebracht werden (vgl. **Abbildung 7-24**). Das Anbringen eines Schwertes hat folgende Vorteile:

- Das Schwert nimmt keinen Raum in den Schwimmern weg,
- der Mechanismus ist einfach und erlaubt ein völliges Trockenlaufen,
- auch bei einer Bodenberührung kann das Schwert nach hinten einklappen und
- das Schwert hat keinen negativen Einfluss auf das Trailern und den Transport.

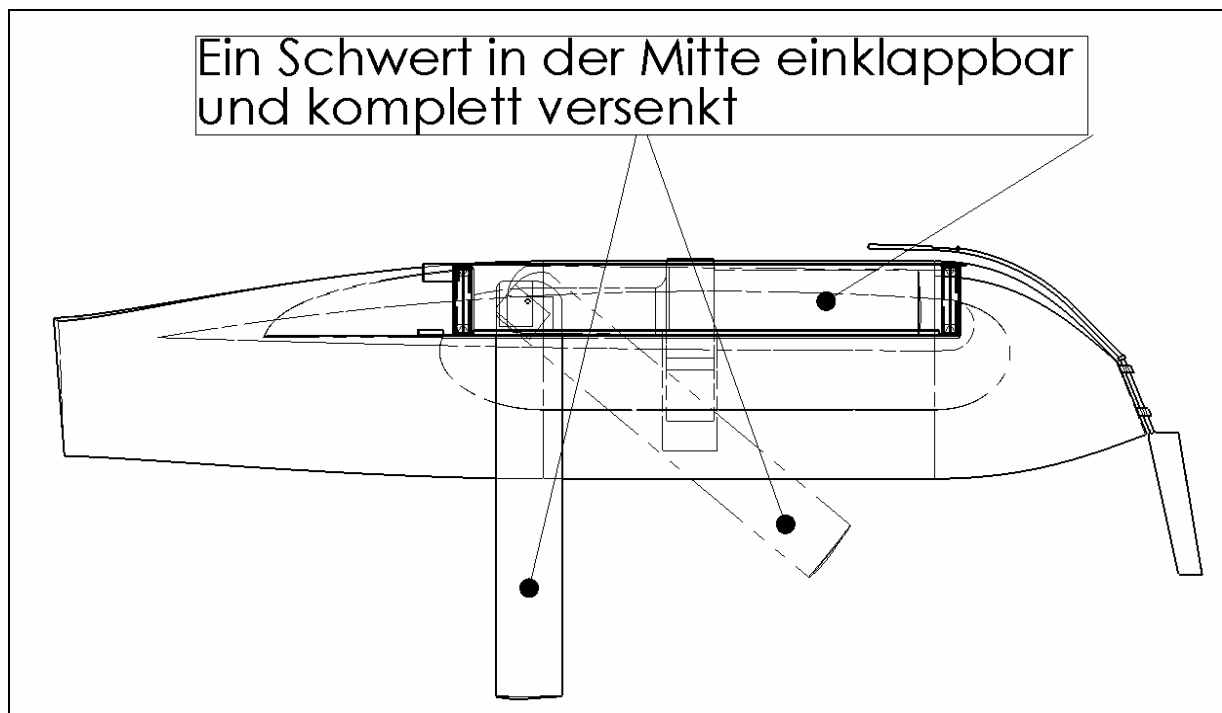


Abbildung 7-24: Schwert ausgefahren und eingeklappt

Im Rahmen einer Dissertation kann nicht die Entwicklung eines gesamten Bootes durchgeführt werden, sondern nur die Konzeption für einzelne wichtige Komponenten. Selbst die Entwicklung dieser Komponenten ist im Prinzip nie ganz abgeschlossen, da es immer wieder einzelne Details zu verbessern gibt. Häufig ist es sogar so, dass die Optimierung eines Details negative Auswirkungen auf andere Details nach sich ziehen kann. Um eine Optimierung nicht endlos zu gestalten, muss an irgendeiner Stelle ein Schlussstrich gezogen werden, um das so erreichte Ergebnis interessierten Bootsherstellern eventuell für eine wirtschaftliche Nutzung zur Verfügung zu stellen.

Die Darstellung in der **Abbildung 7-25** zeigt das endgültig erzielte Ergebnis des umgesetzten Konzeptes für einen trailerbaren Katamaran. Die wichtigsten Komponenten des

Katamarans sind hinsichtlich ihrer Festigkeit überprüft und der Gesamteindruck wirkt optisch ausgereifter als das erste konzipierte Modell (vgl. Abbildung 5-15). In dieser Abbildung sind neben dem Rigg auch die Staken und die Wanten dargestellt, die einen wesentlichen Einfluss auf die Verteilung und die Größe der angreifenden Kräfte ausüben.

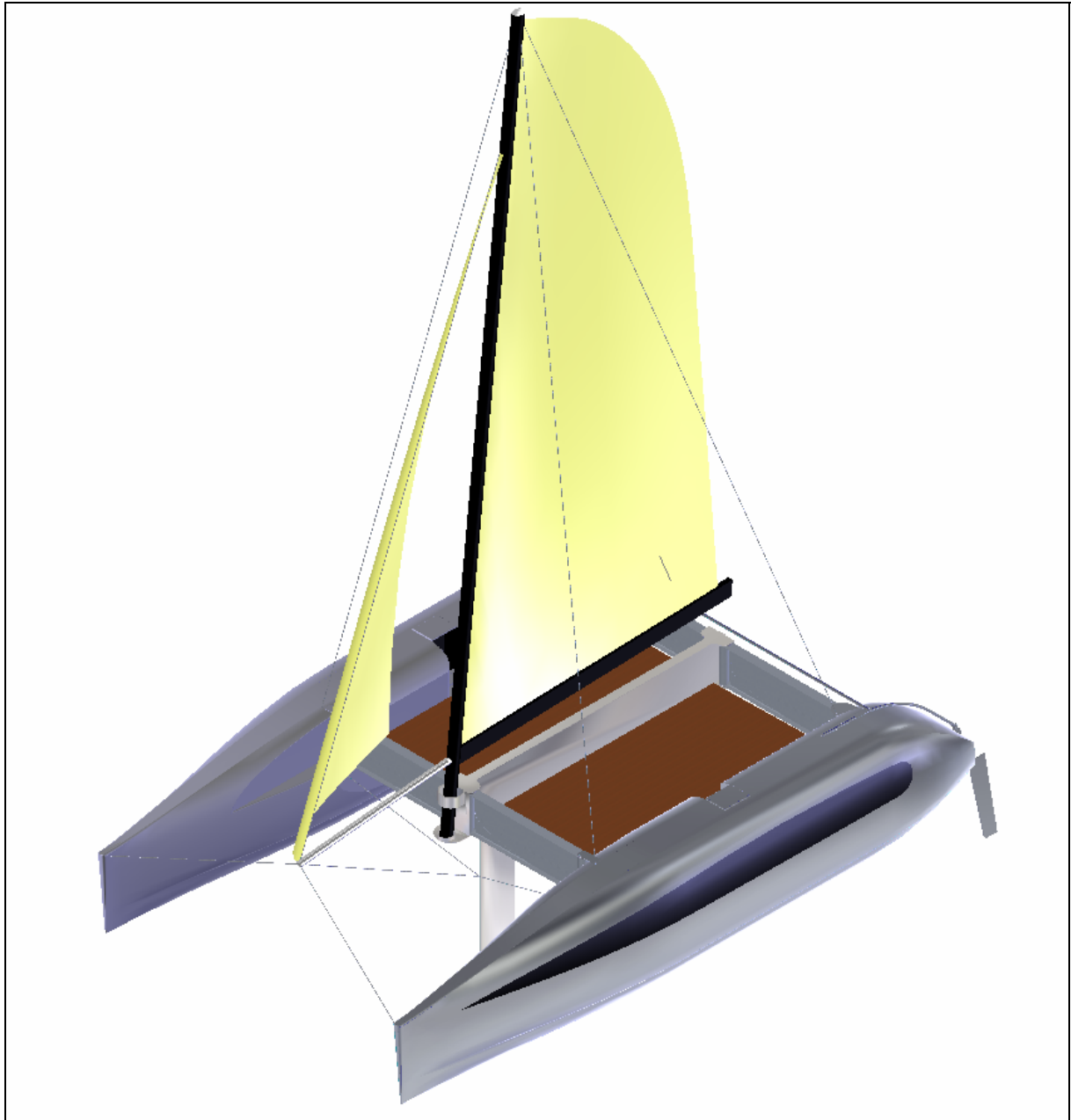


Abbildung 7-25: Schattierte Gesamtansicht mit Segel

In der **Abbildung 7-26** ist noch einmal der aktuelle Klapp-Mechanismus als 3D-Drahtmodell dargestellt, der trotz vieler Änderungen prinzipiell immer noch dem ursprünglichen Konzept entspricht. Der trailerbare Katamaran verfügt jetzt entsprechend den Anforderungen im

ausgefahrenen Zustand über eine Gesamtbreite von 6,5 Metern und zusammengefahren über eine Breite von exakt 2,5 Meter (vgl. **Abbildung 7-27**).

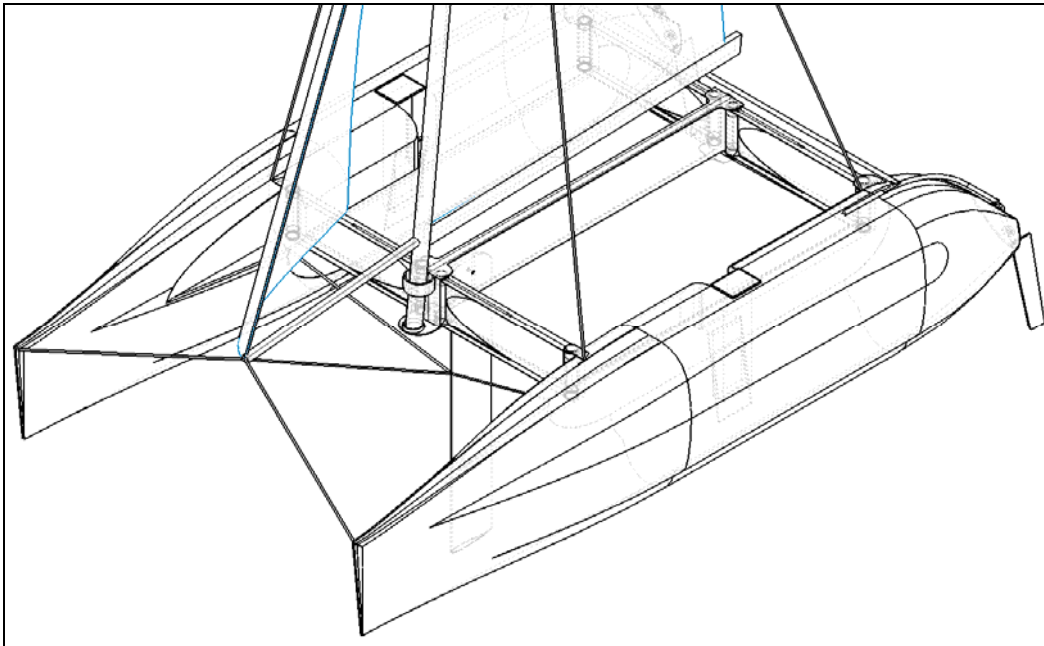


Abbildung 7-26: Endgültiger Klapp-Mechanismus

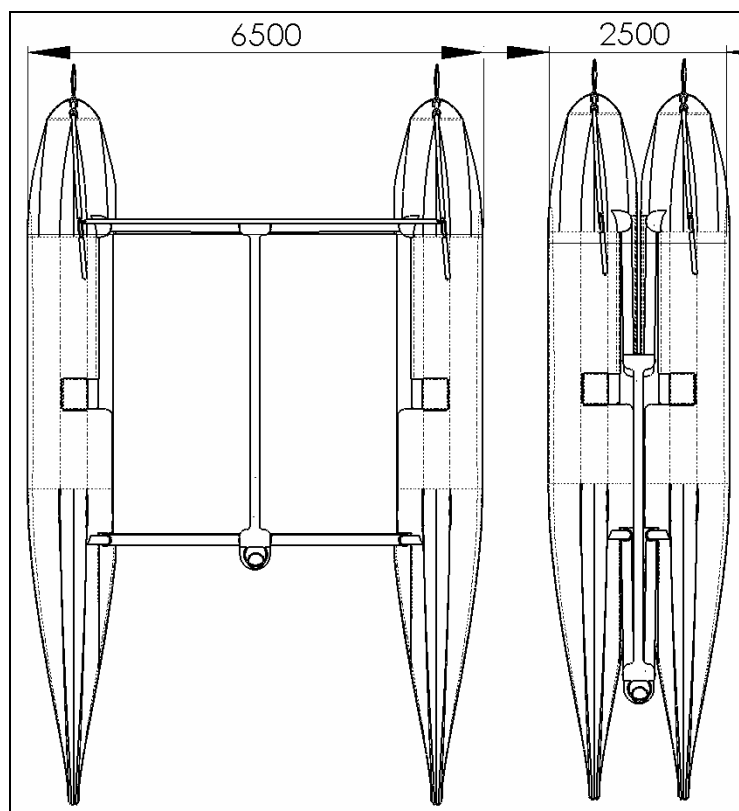


Abbildung 7-27: Schwimmer ausgefahren und zusammengefahren (Sicht von oben)

Die Konstruktion eines komplexen Bauteiles oder einer Baugruppe wird in der Regel nicht an einem Arbeitstag fertig gestellt. Somit muss eine Möglichkeit gegeben werden, dass die Bearbeitung der ablaufgeregelten Produktentwicklung auch unterbrochen werden kann, um diese zu gegebener Zeit ohne Datenverlust fortzusetzen (vgl. **Abbildung 7-28**).

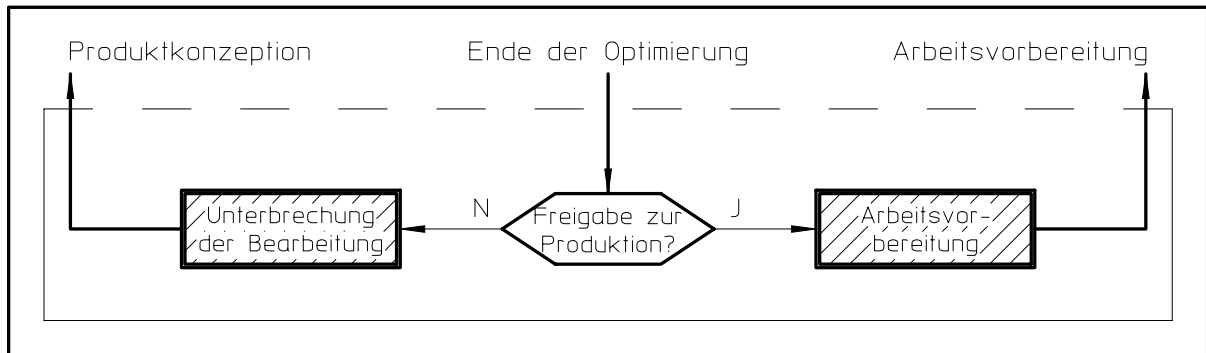


Abbildung 7-28: Ende der Optimierung oder Unterbrechung

Auf der anderen Seite kann die Bearbeitung der ablaufgeregelten Produktentwicklung auch durch die Fertigstellung beendet werden; das heißt, dass eine Optimierung nicht mehr notwendig ist. In diesem Fall wird der Produktentstehungsprozess mit dem Einstieg in den Detailprozess „Arbeitsvorbereitung“ (vgl. Abbildung 3-4) fortgesetzt, vorausgesetzt, ein Unternehmen möchte das von ihm entwickelte Produkt auch vermarkten.

Zum Abschluss hinsichtlich des Nachweises für die Machbarkeit eines ablaufgeregelten Produktentwicklungsprozesses sollen die beiden nachfolgenden Abbildungen aufzeigen, wie die Komponente Gelenkarm sich im Laufe des Entwicklungsprozesses verändert hat (vgl. **Abbildung 7-29**). Die tatsächlichen Veränderungen sind nicht nur graduell, sondern weisen doch einen erheblichen Umfang auf. In Verbindung mit dem Festigkeitsnachweis kann zweifelsfrei festgestellt werden, dass eine derartige Entwicklung mit einem enormen zeitlichen Aufwand verbunden ist.

Darüber hinaus konnten im Ergebnis alle Anforderungen an den Klapp-Mechanismus gemäß Kapitel 5.1 erfüllt werden, wie die schematische Darstellung in der **Abbildung 7-30** zeigt.



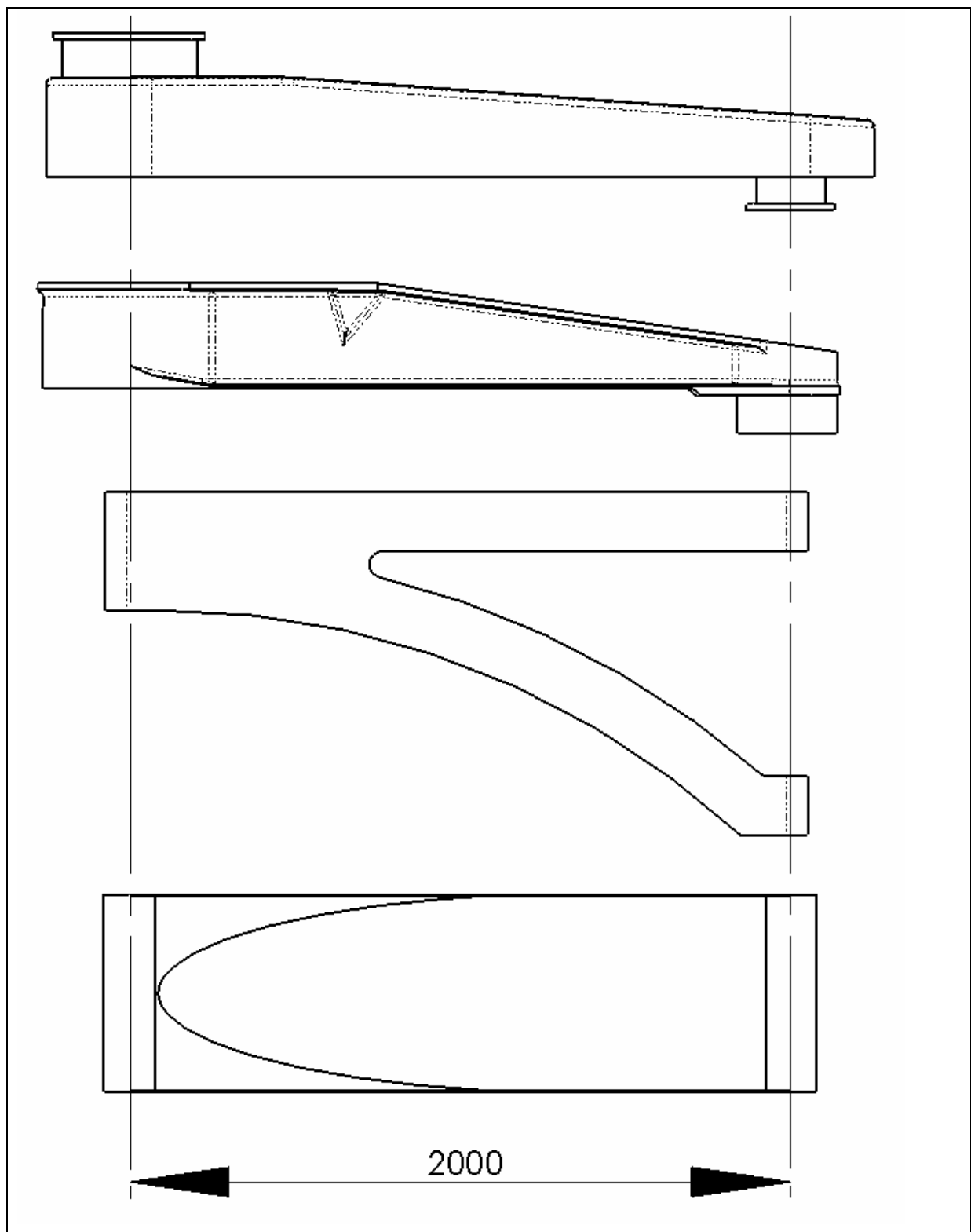


Abbildung 7-29: Schrittweise Veränderung des Gelenkarmes

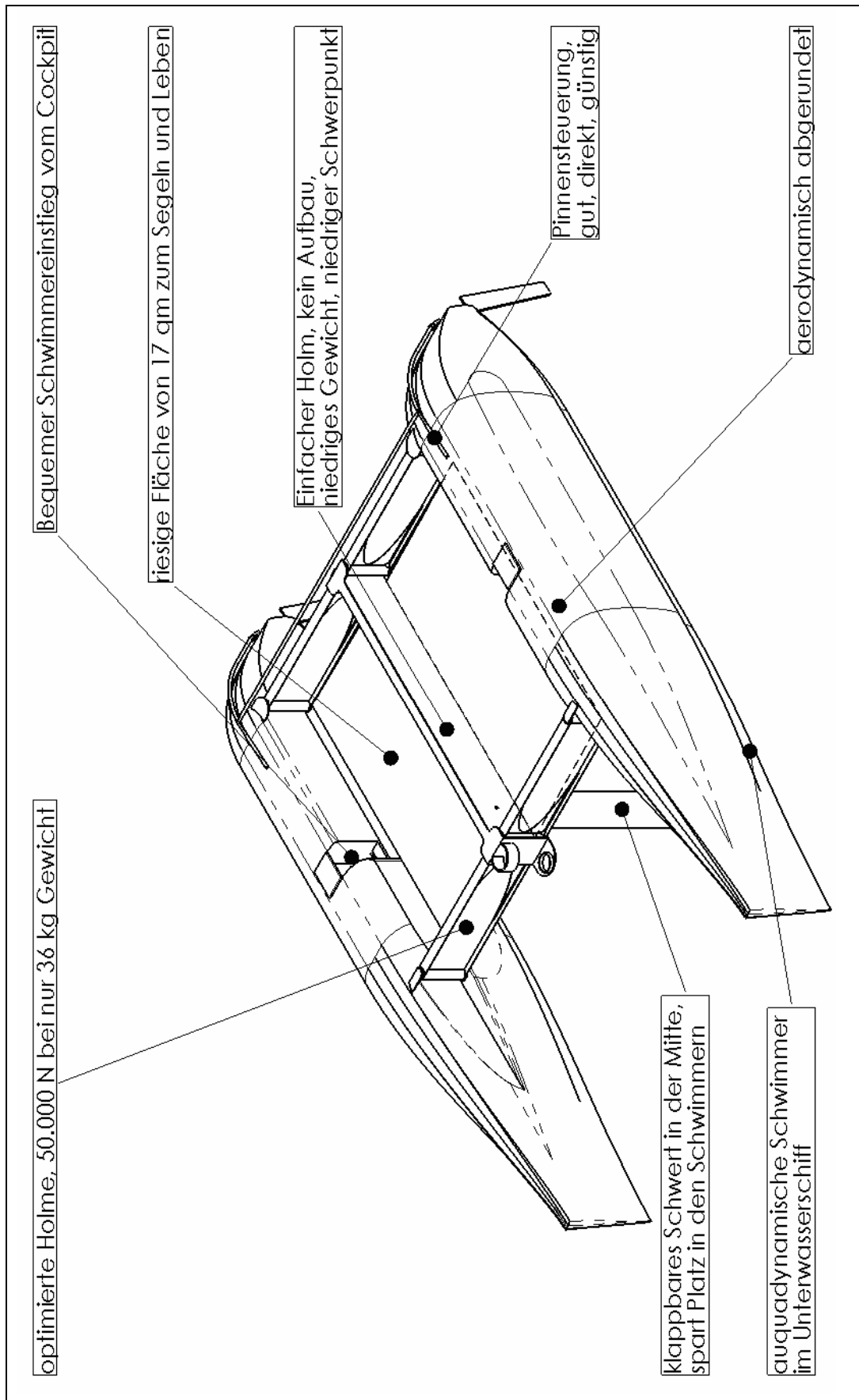


Abbildung 7-30: Erfüllung aller Anforderungen

## 8 Zusammenfassung

Zunächst wurde die Ausgangssituation in der Produktentwicklung hinreichend analysiert. Dabei wurde deutlich, dass unter dem Begriff der Produktentwicklung und hier insbesondere auch unter dem Begriff des Produktentwicklungsprozesses inhaltlich nicht immer das Gleiche verstanden wird. Unabhängig von diesen differierenden Inhalten gehören zu einem Produktentwicklungsprozess die Detailprozesse Produktplanung, Produktkonzeption, Produktdefinition und Versuch und Erprobung. Diese Prozesse lassen sich im Rahmen einer Entwicklung nicht ausschließlich linear abarbeiten, da auf Grund der zunehmenden Komplexität der zu entwickelnden Produkte Rückkopplungen mit den vorherigen Detailprozessen nicht ausgeschlossen werden können.

Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass der Produktentwicklungsprozess wiederum nur einen Teilprozess innerhalb des Produktentstehungsprozesses darstellt, der im weitesten Sinne auch mit den Prozessen der Wertschöpfungskette gleich gesetzt werden kann. Dies kann unter anderem auch zur Folge haben, dass die der Produktentwicklung nachgeschalteten Prozesse ebenfalls Wechselwirkungen auf die aktuell bearbeiteten Prozesse ausüben können. Dies ist insbesondere unter dem Gesichtspunkt eines frühen Markteintrittes für ein neues Produkt zu sehen. Aber auch eine vorwärts gerichtete Wechselwirkung ist denkbar, wenn z.B. in der aktuellen Entwicklung ein sich negativ auswirkender Gesichtspunkt auftritt, welcher sich gegebenenfalls auch auf die bereits in der Produktion befindliche Varianten auswirken kann.

Insbesondere die hier geschilderten Rückkopplungen und Wechselwirkungen beeinflussen in hohem Maße die Produktentwicklung. Dieser Aspekt wird noch verstärkt, wenn das zu konzipierende Produkt über eine komplexe geometrische Form verfügt, dessen Haltbarkeit mit einer entsprechenden Festigkeitsrechnung überprüft werden muss oder wenn eine komplexe Struktur entsteht, deren Funktionalität mittels eines Prototyps überprüft werden muss. Gerade hier ergeben sich häufig erhebliche Änderungen hinsichtlich der eingangs aufgestellten Anforderungen an das Produkt, so dass eine Vielzahl von Optimierungen durchgeführt werden muss. Für diese Änderungen ist es aber unbedingt notwendig, dass die einzelnen Entwickler immer über aktuelle Produktdaten verfügen. Damit dieses gewährleistet werden kann, muss hier ein entsprechendes Produktmodell vorliegen, auf welches alle beteiligten IT-Systeme ohne Einschränkung zugreifen können.

Aus diesem Grunde wurde für das hier vorgelegte Konzept einer ablaufgeregelten Produktentwicklung ein Produktmodell benutzt, welches die in Dateien vorliegenden fachspezifischen Datenmodelle der einzelnen IT-Systeme mittels einer verweisorientierten Zuordnung zu einem Modell zusammenfasst. Darüber hinaus wurden IT-Systeme zur konstruktiven Gestaltung, zur rechnergestützten Nachrechnung, zur Erstellung eines Prototyps und zur Verwaltung der Produktdaten ausgewählt, die alle über eine sehr hohe Integrationstiefe verfügen, so dass ein Datenabgleich zwischen diesen Systemen entfallen kann.

Der Algorithmus für die Ablaufregelung orientiert sich an der Systemtechnik und ist so gestaltet, dass der Entwickler durch alle Detailprozesse zielgerichtet geführt wird, damit er seine ganzen kreativen Kräfte in vollem Umfang für die Umsetzung einer Produktidee in eine problemorientierte Lösung zur Verfügung hat. Des Weiteren ist der Entwickler von allen nur denkbaren Routinetätigkeiten befreit und er kann darüber hinaus bei Vorliegen entsprechender fertigungsspezifischer Kenntnisse das jeweils erzielte konstruktive Ergebnis einer vorläufigen Fertigungssimulation unterziehen, um eine nachträgliche Herstellbarkeit vorab bereits zu überprüfen.

Die am Beispiel eines Klapp-Mechanismus für einen trailerbaren Katamaran erzielten Ergebnisse wurden hinreichend diskutiert und haben deutlich gemacht, dass eine ablaufgeregelte Produktentwicklung zu einem ansprechenden Ergebnis führen kann. Die Richtigkeit der Vorgehensweise wird auch durch die Annahme eines von dem Verfasser dieser Arbeit eingereichten Patentes (vgl. **Abbildung 11-9**) für den hier entwickelten Klappmechanismus unterstrichen.

## 9 Literaturverzeichnis

- |      |  |  |   |
|------|--|--|---|
| [1]  | Bergers, D.  | Produktentwicklung   | Skriptum, Universität<br>Duisburg-Essen 2005    |
| [2]  |  | <a href="http://www.wikipedia.de">www.wikipedia.de</a>   |   |
| [3]  | Beneke, F.   | Konzeptionelle Ansätze einer prozess-<br>orientierten Produktentwicklung   | Diss., Universität<br>Essen, 2002               |
| [4]  | Gausemeier, J.;<br>Lindemann, U.;<br>Reinhart, G.;<br>Wiendahl H. P. | Kooperatives Produktengineering  | Paderborn: HNI,<br>2000, Bd. 79                 |
| [5]  | Dyla, A  | Modell einer durchgängig<br>rechnerbasierten Produktentwicklung  | TU München, Diss.,<br>2002                      |
| [6]  | Arnold, V.<br>Dettmering, H.<br>Engel, T.<br>Larcher, A.             | Product Lifecycle Management<br>beherrschen<br>Ein Anwenderhandbuch für den<br>Mittelstand   | Springer Verlag,<br>ISBN 3-540-22997-3,<br>2006 |
| [7]  | Dürholt, H.  | Konzeption eines Vorgehensmodells für<br>die Durchführung von prozessorientierten<br>PLM-Projekten in mittelständischen<br>Unternehmen   | Diss., Universität<br>Duisburg-Essen,<br>2007   |
| [8]  | Veh, U.,<br>Wissussek, D.  | Ablaufgeregelte Entwurfsphase im<br>Produktentwicklungsprozess   | Technische<br>Mitteilungen 2/03,<br>2003        |
| [9]  | Heimsoth, R.   | Konzeption und Realisierung einer<br>standortübergreifenden Konsolidierung<br>der Produktentwicklung durch eine<br>konzernweite Integration verschiedener<br>ERP-Systeme mittels PDM | Diss., Universität<br>Duisburg-Essen,<br>2007   |
| [10] | Ehrlenspiel, K.  | Integrierte Produktentwicklung   | Hanser-Verlag, 2003,<br>2. Auflage              |
| [11] | Vanja, S.<br>Weber, C.<br>Schliegielsiepen,<br>J.<br>Schlottmann, D. | CAD / CAM für Ingenieure   | Vieweg Verlag,<br>1994                          |

- 
- |      |                          |  |  |
|------|--------------------------|--|--|
| [12] | Wissussek, D.            | Konstruktionslehre IV – Grundlagen des Methodischen Konstruierens  | Skriptum, Universität Duisburg-Essen, 2003     |
| [13] | Künne, B.                | Köhler / Rögnitz, Maschinenteile 1   | Stuttgart, 2005                                |
| [14] | Knieps, M.               | Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für die Handhabung von 3D-CAD-Systemen zur Generierung komplexer Maschinenbaugruppen                                    | Diss., Universität Duisburg-Essen, 2004        |
| [15] | SolidWorks®              | <a href="http://www.SolidWorks.com">www.SolidWorks.com</a>   | Homepage SolidWorks® US, 2006                  |
| [16] | Hallmann, H.             | FEM-Vorlesung  | Skriptum, FH Köln, WS 2005/06                  |
| [17] |                          | <a href="http://www.cosmos.com">www.cosmos.com</a>   |  |
| [18] |                          | <a href="http://www.SolidCAM.de">www.SolidCAM.de</a>   |  |
| [19] |                          | <a href="http://www.SmarTeam.de">www.SmarTeam.de</a>   |  |
| [20] | Lobeck, F.               | Konzept zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen einschließlich Simulation und Rapid Prototyping unter Verwendung eines neuen PLM-CAD-Integrationsmoduls | Habilitation, Universität Duisburg-Essen, 2004 |
| [21] |                          | <a href="http://www.mytilus.de/">www.mytilus.de/</a>   |  |
| [22] |                          | <a href="http://www.john-shuttleworth.com/">www.john-shuttleworth.com/</a>   |  |
| [23] | Asmuß, P.                | Katamarane und Trimarane   | Pietsch Verlag, Stuttgart, 1. Auflage, 2003    |
| [24] | Steinbach, M.            | Konstruktion eines Trimarans mit neuartiger Mastabstützung   | Diplomarbeit, Universität des Saarlandes, 2000 |
| [25] | Künne, B.                | Köhler / Rögnitz, Maschinenteile 2   | Stuttgart, 2005                                |
| [26] | Veh, U.<br>Wissussek, D. | Ablaufgeregelte Entwurfsphase im Produktentwicklungsprozess  | Technische Mitteilungen 2 / 03, 2003           |
| [27] | Scharping, H.D.          | Konstruktion und Bau von Yachten   | ISBN 3-7688-0553-0, 1. Auflage, 1987 (4)       |
| [28] | Musch, G.<br>Schulz, M.  | GFK-Technik im Modellbau   | 1992   |

- |      |                                      |   |  |
|------|--------------------------------------|---|--|
| [29] | DIN Norm: EN<br>ISO 12215-9          | Für kleine Wasserfahrzeuge –<br>Rumpfbauweise und Dimensionierung –<br>Teil 9: Segelboote – Anhänge und<br>Takelagezubehör (ISO / DIS 12215-<br>9:2005) | Deutsche Fassung<br>prEN ISO 12215-<br>9:2006                    |
| [30] | Reinke, K.<br>Lütjen, L.<br>Muhs, F. | Yachtbau, Vorbereitung – Konstruktion –<br>Aufriss  | ISBN: 3-7688-0220-<br>5, 1976                                    |
| [31] | Kraus, N.                            | Rätsel des Riggs  | Delius Klasing<br>Verlag, Ausgabe 21,<br>2005                    |
| [32] | Börms, J.                            | Der Linienriß   | Verlag für Boots-<br>wirtschaft GmbH<br>Hamburg, Heft 2,<br>2005 |
| [33] |                                      | <a href="http://www.gmx.net/de/themen/americas-cup/team-germany/">www.gmx.net/de/themen/americas-cup/team-germany/</a>                                  |  |

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Wertschöpfungskette (in Anlehnung an [1]) .....	2
Abbildung 2-1: Phasen des Produktentwicklungsprozess .....	6
Abbildung 2-2: Datenaustausch mit neutralem Produktmodell (Auszug aus [5]).....	9
Abbildung 2-3: IT-Szenario [7] .....	11
Abbildung 3-1: Integration der IT-Systeme für eine ablaufgeregelte Produktentwicklung .....	14
Abbildung 3-2: Darstellung eines Systems [10] .....	17
Abbildung 3-3: Das TOTE-Schema [10] .....	18
Abbildung 3-4: Ablaufgeregelter Produktentwicklungsprozess .....	19
Abbildung 3-5: Kostenverursachung und Kostenfestlegung [11] .....	21
Abbildung 3-6: Erzeugung eines 3D-Bauteils mit Hilfe von Skizzen [12] .....	23
Abbildung 3-7: Erzeugung eines 3D-Bauteils mit Hilfe von Grundkörpern [12] .....	24
Abbildung 3-8: Übersicht über die CAD-Elemente in SolidWorks [12] .....	25
Abbildung 3-9: Idee der Finite-Elemente-Methode [16] .....	27
Abbildung 3-10: Vernetztes FE-Modell eines Radialventilators [16] .....	28
Abbildung 3-11: FEM als Bestandteil eines integrierten Konstruktions- und Berechnungsprozesses [16] .....	28
Abbildung 3-12: Prozess der Prototypenherstellung [20] .....	32
Abbildung 3-13: Triangulationsverfahren bei der Konvertierung in STL [20] .....	33
Abbildung 3-14: Prinzip des Selektiven Lasersinterns [20] .....	34
Abbildung 3-15: Benutzeroberfläche von SolidWorks mit integriertem SolidCAM .....	35
Abbildung 3-16: Ausgabe einer FE-Analyse von COSMOSWorks in SolidWorks .....	35
Abbildung 3-17: COSMOSWorks in SolidWorks integriert .....	36
Abbildung 3-18: STL-Datenausgabe aus SolidWorks .....	37
Abbildung 3-19: Benutzeroberfläche von SmarTeam .....	38
Abbildung 4-1: Produktfindung .....	39
Abbildung 4-2: Katamaran Segelschiff [22] .....	41
Abbildung 4-3: Vergleich traditioneller und moderner Katamaran .....	42
Abbildung 4-4: Segelrichtung zur Windrichtung und Kreuzen gegen den Wind [2] ....	43
Abbildung 4-5: Kraftverhältnisse am Segel [24] .....	45
Abbildung 4-6: Aufbau und Ausbau eines Katamarans [22] .....	46
Abbildung 5-1: Phase „Produktkonzeption“ .....	51
Abbildung 5-2: Seitenansicht Katamaran VIK 105 [26] .....	53
Abbildung 5-3: Abmessungen des Katamaran VIK 105 .....	53
Abbildung 5-4: Einrichtungsplan VIK 105 .....	54
Abbildung 5-5: Photo von VIK 105 beim Transport .....	55
Abbildung 5-6: Bewegung der Schwimmer (1. Entwicklungsstufe, Sicht von unten) .	57
Abbildung 5-7: Deckaufbau (1. Entwicklungsstufe) .....	58
Abbildung 5-8: Bewegung der Schwimmer (2. Entwicklungsstufe, Sicht von unten) .	58
Abbildung 5-9: Deckaufbau (2. Entwicklungsstufe) .....	59
Abbildung 5-10: Klappmechanismus mit 4 Gelenkarmen (3. Entwicklungsstufe, Sicht von oben) .....	60
Abbildung 5-11: Klappmechanismus mit 2 Gelenkarmen (4. Entwicklungsstufe, Sicht von oben) .....	61
Abbildung 5-12: Zustand "Eingefahren" .....	62
Abbildung 5-13: Zustand "Ausgefahren" .....	63



Abbildung 5-14: Vereinfachte Darstellung der beiden Zustände .....	64
Abbildung 5-15: Gesamtdarstellung von oben.....	65
Abbildung 5-16: Explosionszeichnung des Katamaran-Modells.....	66
Abbildung 5-17: Stückliste des Katamaran-Modells .....	67
Abbildung 6-1: Phase „Produktdefinition“ .....	68
Abbildung 6-2: Zug- und Druckfestigkeit von Bootsbaumwerkstoffen [26, S. 85] .....	70
Abbildung 6-3: Gegenüberstellung Polyesterharz zu Epoxyharz: ([27], S. 267).....	71
Abbildung 6-4: Werkstoffe im Schiffsbau [29] .....	72
Abbildung 6-5: Kräfte im Rigg [31] .....	76
Abbildung 6-6: Belastungen eines Katamaran unter Wind .....	77
Abbildung 6-7: Flächenmittelpunkt der gesamten Segelfläche .....	79
Abbildung 6-8: Darstellung der Kräfte .....	81
Abbildung 6-9: Darstellung vom Kraftdreieck durch Eigengewicht.....	82
Abbildung 6-10: Ausgangssituation des Gelenkarm_1 .....	85
Abbildung 6-11: Auswahl und Eigenschaften des Materials Al Mg 5.....	86
Abbildung 6-12: Darstellung des Bauteils Gelenkarm_1 mit Werkstoffkennwerten ...	87
Abbildung 6-13: Dialog mit COSMOS .....	88
Abbildung 6-14: Eingabe der Lagerung für Gelenkarm_1 .....	88
Abbildung 6-15: Grafische Darstellung der Spannungsverläufe für Gelenkarm_1 .....	89
Abbildung 6-16: FE-Vernetzung Gelenkarm_1 .....	90
Abbildung 6-17: Sicherheitsfaktor des Gelenkarm_1 .....	91
Abbildung 6-18: Spannungsverteilung des Gelenkarm_1 .....	91
Abbildung 6-19: Einbringen eines Mittelstegs in Gelenkarm_1 (1. Optimierung) .....	93
Abbildung 6-20: Sicherheitsfaktor und Festigkeit für den Gelenkarm_1 (1. Optimierung).....	93
Abbildung 6-21: Einbringen von 3 Stegen in Gelenkarm_1 (2. Optimierung).....	94
Abbildung 6-22: Sicherheitsfaktor und Festigkeit für den Gelenkarm_1 (2. Optimierung) .....	95
Abbildung 6-23: Gelenkarm, konstruiert in IPE Bauweise (3. Optimierung).....	95
Abbildung 6-24: Konstruktion des Gelenkarm_2 (3. Optimierung).....	96
Abbildung 6-25: Gelenkarm_2 (3. Optimierung).....	97
Abbildung 6-26: Sicherheitsfaktor des Gelenkarm_2 (3. Optimierung) .....	97
Abbildung 6-27: Spannungsverteilung des Gelenkarm_2 (3. Optimierung) .....	98
Abbildung 6-28: Katamaran mit den neuen Gelenkarmen (Gelenkarm_2).....	99
Abbildung 6-29: Gelenkarm_2 und Ersatzmodell Doppel-T-Träger DIN DIL 360.....	100
Abbildung 6-30: Werte für einen Doppel-T-Träger DIL 360.....	101
Abbildung 6-31: Sicherheitsfaktor des Ersatzmodells .....	102
Abbildung 6-32: Festigkeitsanalyse des Ersatzmodells .....	102
Abbildung 6-33: Spannungsberechnung DIL 360 .....	103
Abbildung 7-1: Phase Versuch / Erprobung .....	104
Abbildung 7-2: Modellausschnitt mit unbehandelten Oberflächen (M 1:20) .....	106
Abbildung 7-3: Katamaran mit ausgefahrenem Schwimmer, Ansicht von vorne .....	107
Abbildung 7-4: Katamaran in ausgefahrener und zusammengefahrener Stellung (Ansicht von vorn).....	108
Abbildung 7-5: Katamaran mit Trampolin .....	108
Abbildung 7-6: Katamaran auf Fuß mit zusammengefahrenen Schwimmern .....	109
Abbildung 7-7: Katamaran Heckansicht mit zusammen gefahrenen Schwimmern..	110
Abbildung 7-8: Vorderansicht des Mechanismus zum Verfahren der Schwimmer...	110
Abbildung 7-9: Draufsicht des Mechanismus zum Verfahren eines Schwimmers....	111
Abbildung 7-10: Konstruktion des Gelenkarm_3 (2D) .....	113
Abbildung 7-11: Konstruktion des Gelenkarm_3 (3D) mit Angabe der Masse.....	113

Abbildung 7-12: Sicherheitsfaktor des Gelenkarm_3 .....	114
Abbildung 7-13: FE-Analyse des Gelenkarm_3 .....	114
Abbildung 7-14: Optimierung, Gesamtansicht schräg vorne .....	115
Abbildung 7-15: Optimierung, Gesamtansicht schräg hinten .....	116
Abbildung 7-16: Optimierung, Ansicht Träger und nach oben geklappte Platten .....	116
Abbildung 7-17: Optimierung, zusammengeklappter Zustand .....	117
Abbildung 7-18: Konstruktion des Gelenkarm_4 (2D) .....	118
Abbildung 7-19: Detail der Konstruktion des Gelenkarm_4 (2D) .....	118
Abbildung 7-20: Konstruktion des Gelenkarm_4 (3D) mit Angabe der Masse .....	119
Abbildung 7-21: FE-Vernetzung Gelenkarm_4 mit Lager .....	120
Abbildung 7-22: FE-Analyse des Gelenkarm_4 mit Lager .....	121
Abbildung 7-23: Sicherheitsfaktor des Gelenkarm_4 mit Lager .....	121
Abbildung 7-24: Schwert ausgefahren und eingeklappt .....	122
Abbildung 7-25: Schattierte Gesamtansicht mit Segel .....	123
Abbildung 7-26: Endgültiger Klapp-Mechanismus .....	124
Abbildung 7-27: Schwimmer ausgefahren und zusammengefahren (Sicht von oben) .....	124
Abbildung 7-28: Ende der Optimierung oder Unterbrechung .....	125
Abbildung 7-29: Schrittweise Veränderung des Gelenkarmes .....	126
Abbildung 7-30: Erfüllung aller Anforderungen .....	127
Abbildung 11-1: Wichtige Segelbegriffe .....	136
Abbildung 11-2: America's Cupper Segelschiff [33] .....	137
Abbildung 11-3: Beaufortscala .....	138
Abbildung 11-4: Von der Idee zum Patent nach [1] .....	139
Abbildung 11-5: Konstruktionsbelastungswerte [29] .....	140
Abbildung 11-6: Internet-Präsentation (Auszug) .....	141
Abbildung 11-7: Prototyp auf dem ISTECC-Messestand der Boot 2006 .....	142
Abbildung 11-8: Messe-Kontaktbogen Boot 2006 .....	143
Abbildung 11-9: Annahme des eingereichten Patentes .....	144

## 11 Anhang

<b>Bug</b>	die Nase des Bootes
<b>Backbord</b>	links
<b>Steuerbord</b>	rechts
<b>Achtern</b>	hinten
<b>Heck</b>	das Ende des Bootes
<b>Lee</b>	dem Wind abgewandte Seite
<b>Luv</b>	dem Wind zugewandte Seite
<b>Abfallen</b>	nach Lee wegdrehen
<b>Anluven</b>	höher zum Wind hindrehen
<b>Aufschiesse</b>	in den Wind fahren
<b>Wende</b>	Kurve gegen den Wind
<b>Halse</b>	Kurve in den Wind
<b>Segel</b>	aus winddichtem Segeltuch genäht und treibt das Boot an
<b>Mast</b>	trägt das Segel
<b>Wanten</b>	halten den Mast
<b>Saling</b>	spreizt die Wanten
<b>Baum</b>	hält das Segel unten
<b>Schot</b>	das Segel wird auf den Wind eingestellt
<b>Fock</b>	das Segel vor dem Mast
<b>Fockschot</b>	damit wird die Fock auf den Wind eingestellt
<b>Rigg</b>	gesamtes Segel inklusive Fock, Groß, Mast, Baum etc.
<b>Vorstag</b>	hält den Mast und trägt die Fock
<b>Stagreiter</b>	damit wird die Fock an dem Vorstag befestigt
<b>Krängung</b>	seitliche Neigung (Schräglage) eines Segelbootes bei Wind
<b>trailerbar</b>	transportierbar mit einem Anhänger auf den Straßen hinter einem KFZ

Abbildung 11-1: Wichtige Segelbegriffe

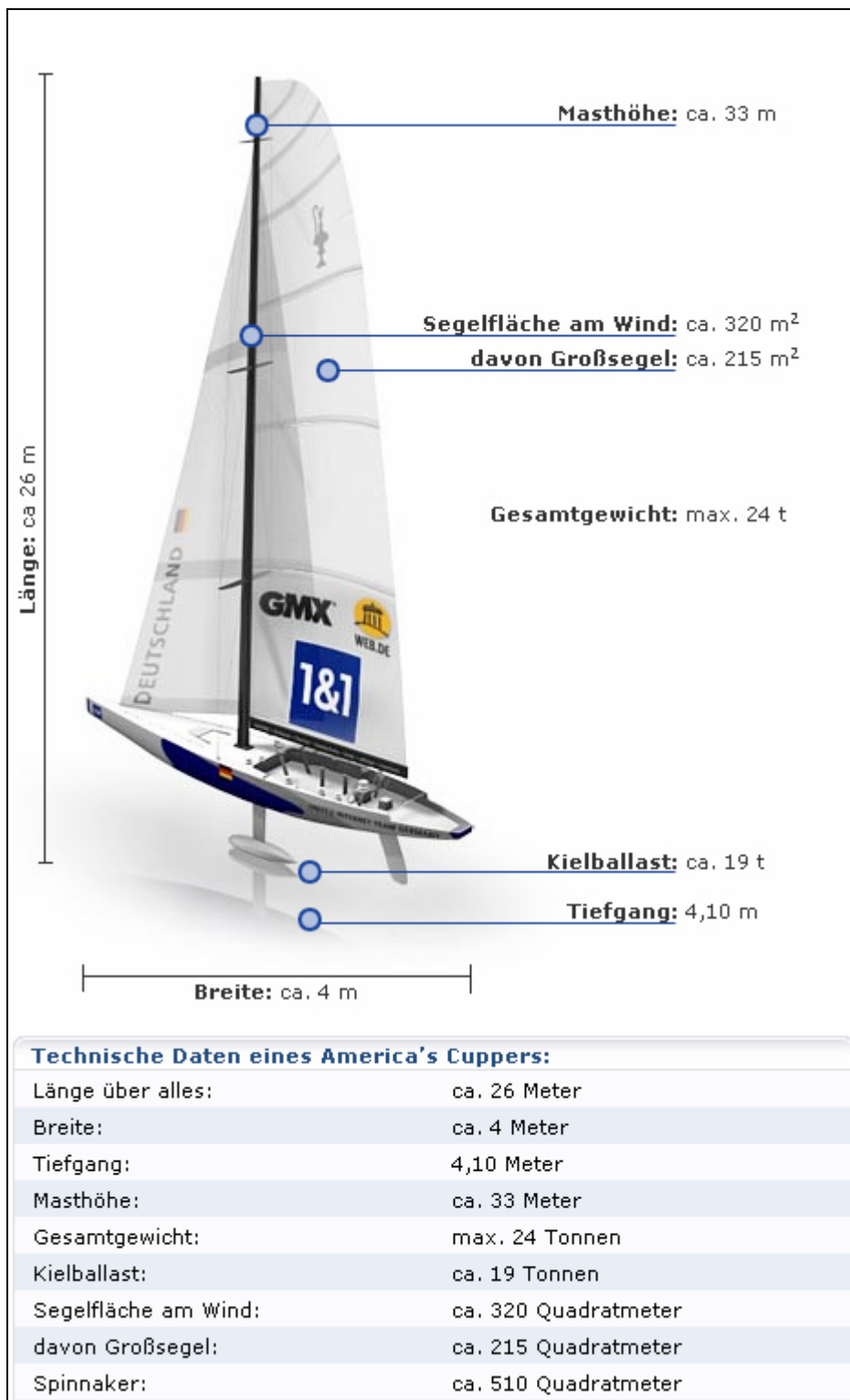


Abbildung 11-2: America's Cup Segelschiff [33]

<b>Beaufortscala</b>				
<b>Beaufort</b>	<b>Geschw. in kn</b>	<b>englisch</b>	<b>deutsch</b>	<b>Zustand der See</b>
0	0	calm	Windstille	Spiegelglatte See
1	1 - 3	light air	leiser Zug	Ruhige gekräuselte See. Kleine schuppenförmige Kräuselwellen ohne Schaumköpfe.
2	4 - 6	light breeze	leicht Brise	Gekräuselte See, kleine noch kurze Wellen mit ausgeprägten glasigen Kämmen, die noch nicht brechen.
3	7 - 10	gentle breeze	schwache Brise	Schwach bewegte See. Kämmen beginnen zu brechen, Schaum glasig und vereinzelte kleine Schaumköpfe.
4	11 - 16	moderate breeze	mäßige Brise	Leichtbewegte See. Wellen noch klein aber länger, verbreiteter weiße Schaumköpfe
5	17 - 21	fresh breeze	frische Brise	Mäßig bewegte See. Mäßige Wellen von ausgeprägter langer Form. Allgemein weiße Schaumköpfe, vereinzelt schon Gischt.
6	22 - 27	strong wind	starker Wind	Grobe See. Beginn der Bildung großer Wellen mit brechenden Kämmen, größere weiße Schaumflächen, etwas Gischt.
7	28 - 33	near gale	steifer Wind	Sehr grobe See. Die See türmt sich mit brechenden Wellen, der weiße Schaum beginnt sich in Streifen in Windrichtung zu legen.
8	34 - 40	gale	stürmischer Wind	Sehr grobe See. Mäßig hohe Wellenberge mit langen Kämmen, von denen Gischt abzuweichen beginnt. Der Schaum legt sich in stärker ausgeprägten Streifen in Windrichtung.
9	41 - 47	severe gale	Sturm	Hohe See. Hohe Wellenberge, dichte Schaumstreifen in Windrichtung. Die See beginnt zu "Rollern" und die Sicht kann schon durch Gischt vermindert sein.
10	48 - 55	storm	schwerer Sturm	Sehr hohe See. Sehr hohe Wellenberge mit langen überbrechenden Kämmen. Die See ist schaumbedeckt weiß. Schweres stoßartiges Rollen der See. Gischt beeinträchtigt die Sicht.
11	56 - 63	violent storm	orkanartiger Sturm	Sehr hohe See. Außergewöhnlich hohe Wellenberge. Durch Gischt herabgesetzte Sicht
12	$\geq 64$	hurricane	Orkan	Außergewöhnlich schwere See. Die See ist vollständig weiß. Die Luft ist voller Schaum und Gischt. Die Sicht ist stark herabgesetzt, Fernsicht ist nicht mehr möglich.

Abbildung 11-3: Beaufortscala

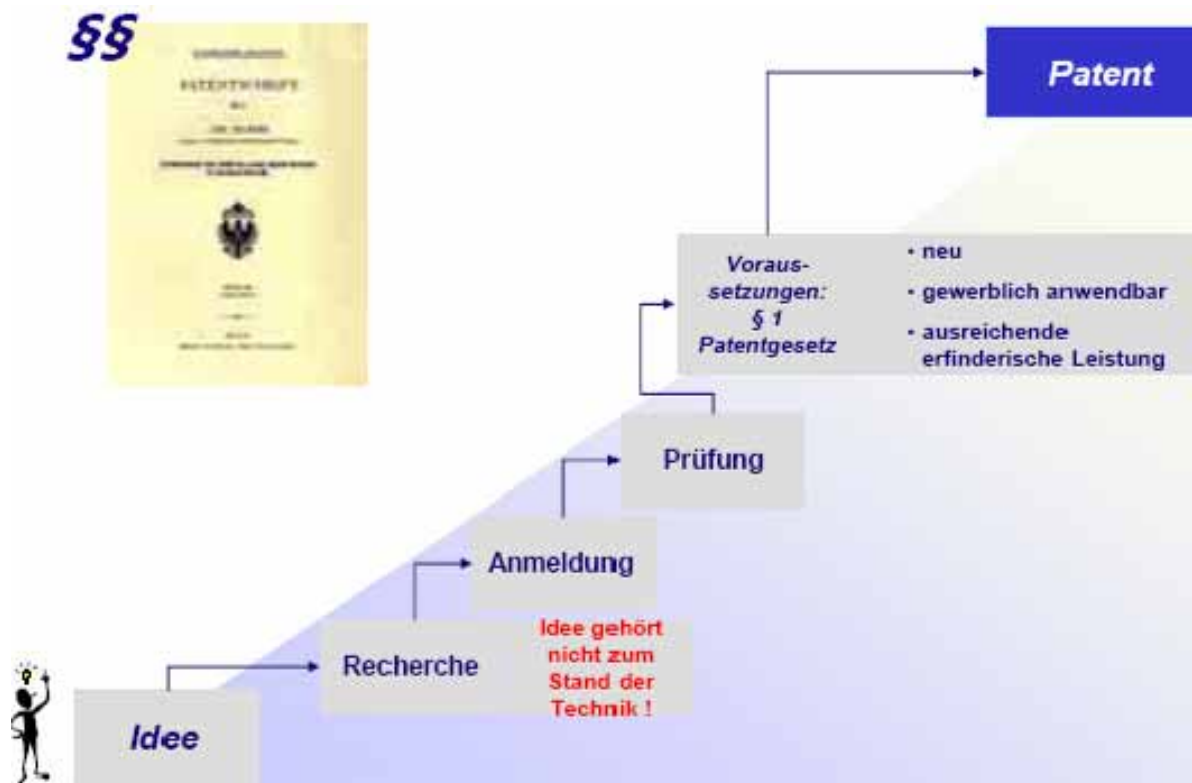


Abbildung 11-4: Von der Idee zum Patent nach [1]

Für direkte Belastungen und Gesamtbelastungen müssen die Werte in Tabelle 3 benutzt werden.

**Tabelle 3 — Konstruktionsbelastungswerte**

Werkstoff	Direkte Belastungen			Gesamtbelastungen
	$\sigma_d$	$\tau_d$	$\sigma_{db}$	
<b>Verformungsbruchmetalle<sup>a</sup></b>	$\min(0,5 \sigma_u; 0,9 \sigma_y)$	$0,58 \sigma_d$	$1,8 \sigma_d$	$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_d$
<b>Sprödbbruchmetalle<sup>b</sup></b>	$\min(0,33 \sigma_u; 0,6 \sigma_y)$	$0,58 \sigma_d$	$1,8 \sigma_d$	$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_d$
<b>Holz und GfK</b>	$0,5 \sigma_u$	$0,5 \tau_u$	$1,8 \sigma_d$	$\left(\frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_u}\right)^2 < 0,25$
<sup>a</sup> Stahl, Nicht rostender Stahl, Aluminiumlegierungen, Titanlegierungen, Kupferlegierungen, Blei-Antimon-Legierungen, siehe Anhang A.				
<sup>b</sup> Graugusseisen, siehe Anhang A.				

Dabei ist

$\sigma_d$  die Konstruktions-Zug-, Druck- bzw. Biegefestigkeit (je nach Relevanz) (N/mm<sup>2</sup>);

$\sigma_u$  die maximale Zug-, Druck- bzw. Biegefestigkeit (je nach Relevanz) (N/mm<sup>2</sup>);

$\sigma_y$  die Streck-Zug-, Druck- bzw. Biegefestigkeit (je nach Relevanz) (N/mm<sup>2</sup>);

$\sigma_{db}$  die Konstruktionslagerfestigkeit (N/mm<sup>2</sup>);

$\tau_u$  die maximale Schubfestigkeit (N/mm<sup>2</sup>);

$\tau_d$  die Konstruktionsschubfestigkeit (N/mm<sup>2</sup>).

**ANMERKUNG** Um mit den Teilen 5 und 8 von ISO 12215 konform zu gehen, sind die Konstruktionsbelastungen hoch. Um dieses zu berücksichtigen, sind die tatsächlichen Lasten, wo relevant, um einen ausreichend dynamischen Faktor erhöht.

Für typisch nicht rostenden Stahl oder Bolzenwerkstoff aus halbhartem Stahl müssen die Festigkeitswerte aus den Tabellen 4 bis 6, je nach Relevanz, entnommen werden, es sei denn, es werden gesondert dokumentierte Bolzen verwendet.

Für weitere Metalle oder speziell angefertigte Stahlbefestiger müssen die Festigkeitswerte aus Anhang A.1 entnommen werden, je nach Relevanz.

Für Holz oder Verbundwerkstoffe müssen die Festigkeitswerte aus den jeweiligen Anhängen von ISO 12215-5 entnommen werden.

**Abbildung 11-5: Konstruktionsbelastungswerte [29]**



# trailerCAT



## *Segeln neu definiert....*

Dieses völlig neue Konzept vereint die Vorteile eines leistungsfähigen, bewohnbaren Katamarans mit der Möglichkeit des problemlosen Transportierens. Die beiden Schwimmer werden einfach mittels eines patentierten Mechanismus komplett unter den mittleren Deckaufbau gefahren. Somit ergibt sich eine Trailerbreite von 2,5 m. Ausgefahren wird eine Breite von ca. 6,5 m erreicht.

technische Daten:

Länge: ca. 10 m

Breite 6,5 m, zusammengefahren 2,5 m

Gewicht ca. 2.800 kg

Stehhöhe in den Schwimmern

Kojenbreite ca. 1,2 m

Motoren: Außenborder

Bestückt mit Schwertern, daher minimaler Tiefgang möglich

Der Boden des Steuerstandes wird um 0,5 m abgelassen, wenn die Schwimmer sich in ausgefahrener Stellung befinden..

Kontakt: Stefan Stange, 02133-5302-66

Abbildung 11-6: Internet-Präsentation (Auszug)





Abbildung 11-7: Prototyp auf dem ISTEC-Messestand der Boot 2006



## trailerCAT Kontaktbogen

Klassifizierung:  
(A, B, C)

Geschäftskarte

Datum	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Firma/Name	
Anschrift	
Kontaktperson	
Telefon	
eMail :	

Interesse an: ☒

- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> trailerCAT Infos | <input type="checkbox"/> Sponsoring |
| <input type="checkbox"/> evt. Kauf        | <input type="checkbox"/> Bau        |

### Vereinbarungen:

- ☐ Kontakt halten, über Neuerungen Informieren  
☐ konkretes Interesse, Spezifikationen und Angebot

### Sonstige Vereinbarungen und Kommentare:


### Mitwirken auf Entwicklung

Was halten Sie von dem Konzept	
Bei was haben Sie Bedenken	
Würden Sie den TrailerCat kaufen	
Welcher Preis ist realistisch	
Besondere Wünsche, Ausstattung Segel, Trailer, Motor, etc...	
Segelerfahrung, welche, Schiff	
Katamaranerfahrung?	
Erfahrung mit Trailern von Booten	

Abbildung 11-8: Messe-Kontaktbogen Boot 2006

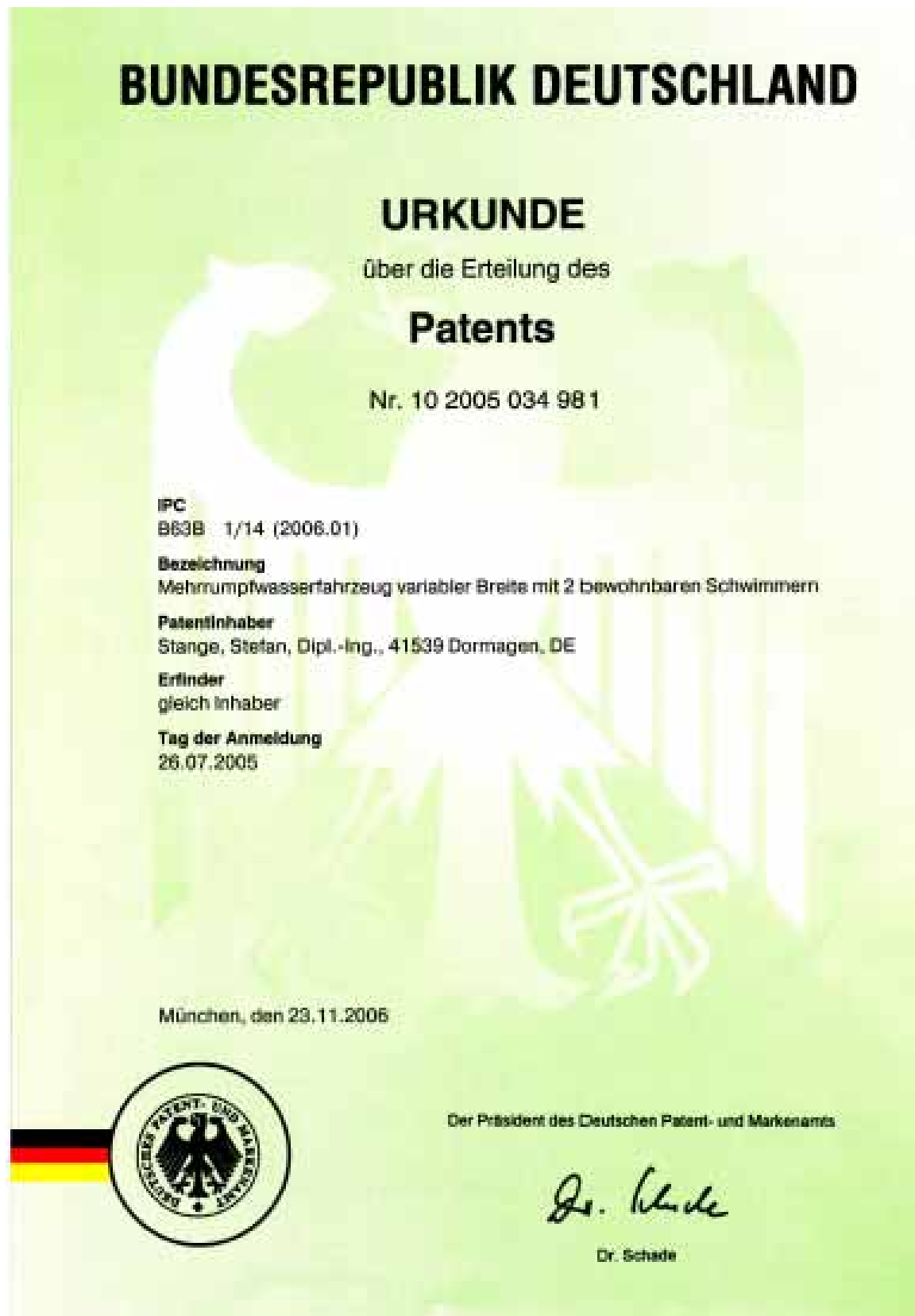


Abbildung 11-9: Annahme des eingereichten Patentes